8.4

Lubrificazione e lubrificanti

8.4.1 Introduzione

La lubrificazione è l'operazione mediante la quale, per interposizione di una sostanza con caratteristiche adatte, vengono ridotti l'attrito e l'usura tra le superfici a contatto di solidi in movimento relativo.

Attrito e usura sono, come è noto, fenomeni ben distinti. L'attrito è una forza resistente risultante dalla somma della forza necessaria per rompere le adesioni tra le microasperità superficiali e della forza di deformazione richiesta per incidere eventuali solcature quando i corpi solidi si muovono o tendono a muoversi l'uno sull'altro; a esso sono associati consumo di energia e produzione di calore. L'usura, invece, è un processo di perdita progressiva di materiale causato dal movimento delle superfici. Si può sviluppare per cause di natura diversa (per esempio, adesione e strappo delle asperità, abrasione, fatica, corrosione) che determinano, in ogni caso, modifiche della morfologia delle superfici, delle dimensioni e della massa dei corpi.

Non sempre è richiesto che attrito e usura siano ridotti insieme; talvolta può essere desiderabile ridurre l'usura e non l'attrito (per esempio, frizioni a bagno d'olio) oppure l'attrito e non l'usura (per esempio, rodaggio, operazioni di lucidatura e molatura), tuttavia in generale la loro riduzione è un'esigenza comune di molte applicazioni e la lubrificazione, nelle sue varie forme, costituisce il modo per ottenerla.

È comprensibile come la lubrificazione, per i fenomeni che coinvolge, possa avere un impatto rilevante sul comportamento dinamico delle macchine e dei sistemi meccanici. Se attuata correttamente, essa favorisce il loro buon funzionamento, migliorando il rendimento generale, riducendo l'energia dissipata e attenuando il logoramento dei componenti. Per contro una lubrificazione inadatta o assente può portare in breve tempo alla messa fuori uso di una macchina, con danni anche rilevanti.

A una lubrificazione ben orientata si accompagnano benefici economici significativi attraverso il risparmio di energia, la conservazione dei materiali e la riduzione degli interventi di manutenzione, con riflessi positivi anche sull'impatto ambientale. Si stima che la riduzione dell'attrito faccia diminuire approssimativamente del 4,5% il consumo totale di energia dei paesi industrializzati.

Anche se il processo è noto, in alcune sue pratiche elementari, fin dai tempi antichi, la nascita della moderna lubrificazione si fa risalire alla seconda metà del 19° secolo, sotto la spinta di una crescente industrializzazione, quando sono state definite le prime equazioni della lubrificazione idrodinamica. Da allora una quantità enorme di studi e applicazioni ha portato a un continuo chiarimento dei molteplici aspetti nei quali la lubrificazione si articola. Gli studi più recenti rivelano diverse aree ancora da investigare, con potenzialità applicative promettenti, e attestano che la ricerca nel campo della lubrificazione è tuttora viva e fiorente.

Modi di lubrificazione

Un metodo semplice per ridurre l'attrito e l'usura tra corpi contrapposti in movimento relativo è quello di interporre tra le superfici una sostanza che scorra più facilmente del solido sottostante. Questo può essere conseguito o mediante un film fluido capace di mantenere le superfici completamente separate, così da impedire il contatto tra le asperità, oppure mediante la formazione sulle superfici di una pellicola sottile, scorrevole e di elevata resistenza.

Ciò è quanto si può riscontrare nei tre modi fondamentali di lubrificazione che si possono presentare nei sistemi reali: a film fluido, limite e mista. I tre suddetti modi di lubrificazione, a cui corrispondono situazioni di attrito e usura ben distinguibili, vengono generalmente discriminati in base a un parametro guida noto come rapporto λ, definito dal rapporto tra lo spessore

del film o dello strato protettivo e la rugosità media delle superfici.

Lubrificazione a film fluido

La caratteristica principale di questo modo di lubrificazione è che le superfici sono separate da un fluido considerevolmente più spesso delle irregolarità superficiali e dei film protettivi che su di esse si possono formare per opera di reazioni chimiche. Lo spessore è tale da consentire al film di comportarsi come il *bulk* del fluido. La separazione delle superfici è realizzata per mezzo della pressione del fluido, la quale può essere generata internamente al contatto (idrodinamica e varianti), oppure prodotta esternamente a esso (idrostatica). L'attrito del contatto segue le leggi dell'attrito viscoso.

Nella lubrificazione idrodinamica (aerodinamica nel caso di gas) la pressione generata internamente al contatto è funzione delle caratteristiche geometriche, delle condizioni dinamiche e cinematiche del contatto e delle proprietà del lubrificante. Questa forma di lubrificazione si può incontrare in accoppiamenti meccanici caratterizzati da superfici conformi con gap decrescenti, quando sono sottoposti a una sufficiente velocità di scorrimento. Esempi di accoppiamenti reali che riproducono queste condizioni sono le coppie prismatiche (per esempio cuscinetti reggispinta) e le coppie rotoidali (per esempio cuscinetti cilindrici). Il parametro λ può assumere in questi casi valori variabili entro un intervallo compreso tra un minimo di 5 e un massimo di circa 100.

Nella lubrificazione elastoidrodinamica la pressione interna raggiunge localmente valori molto elevati, tali da provocare la deformazione elastica delle superfici. In tali condizioni il film fluido acquista maggiore stabilità, così da poter assicurare un basso attrito anche per spessori inferiori al film idrodinamico. In questo regime il parametro λ può assumere valori compresi tra 1 e 10. Condizioni elastoidrodinamiche si possono incontrare in accoppiamenti meccanici con superfici a geometrie tipicamente non conformi e soggette a movimenti che comprendono una significativa componente di rotolamento. A causa della limitatezza della zona del contatto, riconducibile, estremizzando, a un punto o a una linea, in questi contatti si sviluppano, sotto l'azione di carichi anche modesti, pressioni locali molto elevate, responsabili della deformazione elastica delle superfici. Ingranaggi, cuscinetti a rulli e a sfere e camme sono alcuni esempi di accoppiamenti reali che possono operare in questo regime.

Una forma di lubrificazione con pressione generata esternamente al contatto si presenta, invece, nella lubrificazione idrostatica (aerostatica nel caso di gas). In questo caso il fluido lubrificante è pompato nell'accoppiamento con una pressione già sufficiente a provocare il distacco delle superfici, condizione che può essere poi mantenuta anche in assenza di moto relativo. È questa una modalità di lubrificazione riservata a situazioni particolari, spesso complessa e onerosa, che trova per esempio applicazione in sistemi lenti e pesanti, che non consentono di sfruttare effetti idrodinamici o che occorre salvaguardare da arresti indesiderati.

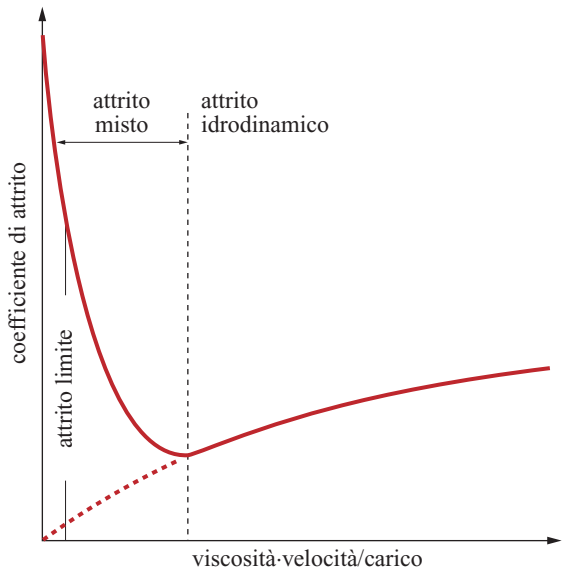


fig. 1. Coefficiente di attrito di un cuscinetto in funzione di variabili operative rilevanti (curva di Stribeck).

Lubrificazione limite

Costituisce la condizione opposta alla precedente per quanto riguarda la separazione delle superfici. In questo modo di lubrificazione l'attrito e l'usura sono determinati dalle proprietà del solido e degli strati superficiali con spessori di livello molecolare o poco più, che si formano per interazione del solido con il lubrificante o l'atmosfera circostante. L'attrito segue in molti casi leggi analoghe a quelle del contatto non lubrificato.

Ai fini della lubrificazione sono importanti le caratteristiche chimiche e chimico-fisiche del lubrificante, mentre le caratteristiche fisiche riferite al bulk del fluido hanno rilievo scarso o nullo.

È un modo di lubrificazione che si può incontrare in contatti di vario tipo, accomunati dalla prerogativa di operare in condizioni di carico elevato in rapporto alla velocità delle superfici.

Poiché lo spessore degli strati superficiali è piccolo a confronto con le rugosità delle superfici, in questo modo di lubrificazione il parametro λ assume valori inferiori all'unità.

Lubrificazione mista

Comprende entrambi i modi precedenti e si presenta quando nel contatto coesistono zone di stretto avvicinamento delle superfici, in cui l'attrito e l'usura sono

determinati dalle loro interazioni e dalla lubrificazione limite, insieme a zone in cui prevale una sostanziale azione di lubrificazione a film fluido. Quest'ultima è talvolta favorita da effetti idrodinamici originati da irregolarità locali (lubrificazione delle asperità).

L'influenza del lubrificante si manifesta sia mediante le proprietà fisiche di bulk, sia attraverso le interazioni chimiche con i solidi.

È un modo di lubrificazione alquanto diffuso, che si può incontrare in molti elementi di macchine come ingranaggi, cuscinetti a rulli e a sfere, e anche in cuscinetti piani convenzionali. Le condizioni operative che lo caratterizzano sono tali per cui lo spessore totale dei film limite e fluido supera le asperità superficiali di un fattore che può variare da 2 a 5 (in dipendenza anche dal tipo di finitura delle superfici).

Azione del lubrificante

Uno stesso accoppiamento meccanico può mutare il modo di lubrificazione in funzione delle condizioni operative. Il passaggio da un regime di lubrificazione a un altro è ben evidenziato nel diagramma di Stribeck (**fig. 1**), nel quale il coefficiente di attrito è riportato in funzione di un parametro adimensionale dato dal prodotto della viscosità per la velocità diviso il carico (forza per unità di lunghezza). Alla variazione del modo di lubrificazione si accompagnano possibilità di funzionamento diverse da parte del lubrificante.

In sistemi meccanici complessi uno stesso lubrificante, per svolgere efficacemente la sua funzione, è chiamato a mettere in atto modalità di azione adeguate al regime di lubrificazione in cui si trova di volta in volta a operare. Tali azioni fanno leva sostanzialmente su alcune sue proprietà fisiche di bulk e su alcune proprietà chimiche o chimico-fisiche.

Aspetti fisici

Nel regime idrodinamico il lubrificante contribuisce alla pressione interna del contatto mediante la viscosità, che determina anche l'attrito. Internamente a questi contatti si viene a sviluppare un gradiente di pressione, in conseguenza della necessità di mantenere una portata costante di fluido nel trascinamento attraverso sezioni decrescenti del meato (**figg. 2** e **3**). L'azione di questo gradiente è tale da ridurre la velocità del fluido in ingresso al meato, aumentare quella in uscita e opporsi nel contempo allo schiacciamento delle superfici. Le equazioni teoriche che descrivono questo comportamento sono state definite da Reynolds verso la fine del 19° secolo.

Sempre attraverso la sua viscosità il lubrificante può contribuire alla pressione del contatto anche attraverso un altro meccanismo, noto come *squeeze* (**fig. 4**), che si verifica quando il fluido viene intrappolato tra superfici in avvicinamento. In questo caso la viscosità determina la resistenza alla fuoriuscita del lubrificante dal

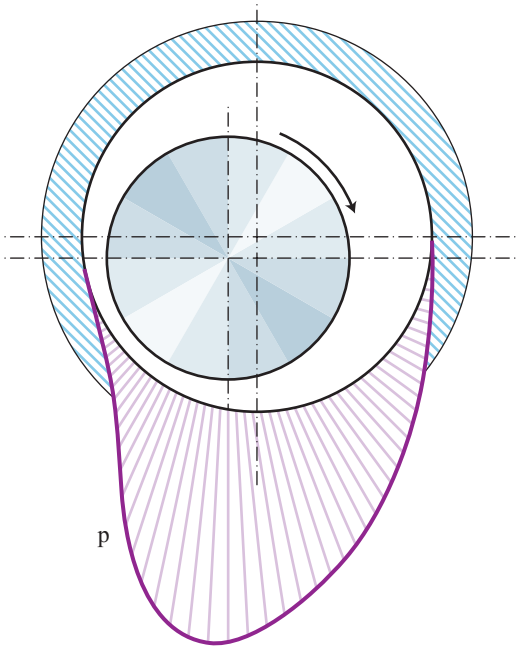


fig. 3. Pressione del lubrificante (p) in un cuscinetto.

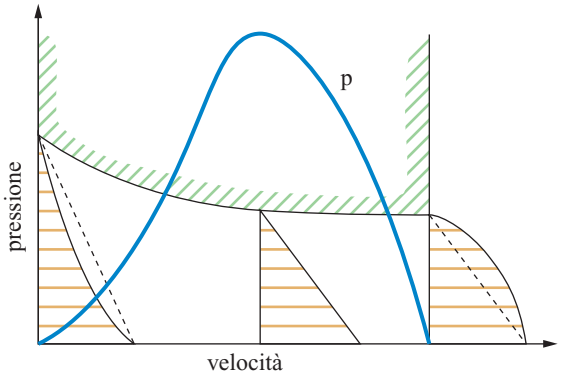


fig. 2. Distribuzione della pressione (p) in un cuneo fisico.

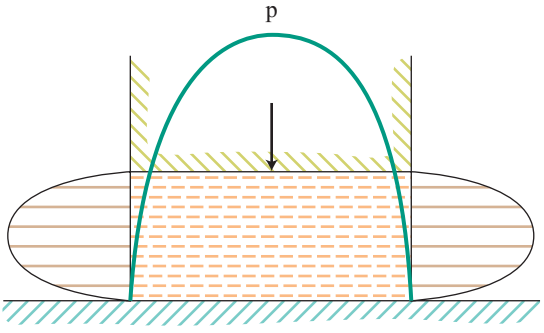


fig. 4. Distribuzione della pressione (p) di squeeze.

contatto, creando un effetto cuscinetto che si oppone all'avvicinamento delle superfici. Si genera così una pressione che acquista maggiore rilievo con film sottili ed è tenuta in particolare considerazione nella progettazione di cuscinetti a carico pulsante o per macchine alternative.

Per comprendere poi il contributo che il lubrificante apporta nella lubrificazione elastoidrodinamica (**fig. 5**), è necessario considerare due specifici fattori. Uno è che, per effetto della elevata pressione locale, il lubrificante, nel brevissimo tempo di transito nel contatto, aumenta fortemente la sua viscosità, arrivando ad assumere una istantanea consistenza vetrosa, che oppone una forte resistenza all'avvicinamento delle superfici. L'altro fattore è che la deformazione elastica presente in questa forma di lubrificazione, allargando l'area di sostegno, aumenta la capacità del lubrificante di non sfuggire e di resistere nella zona del contatto. Il risultato è che il film fluido, che assume un tipico profilo quasi parallelo, acquista stabilità e si mantiene integro fino a spessori molto bassi. In queste situazioni il contributo del lubrificante alla lubrificazione deriva non solo dalla viscosità, ma anche dalla relazione di dipendenza della viscosità dalla pressione. I fondamenti teorici della lubrificazione elastoidrodinamica posti da Ertel e Grubin nel corso degli anni Quaranta del 20° secolo hanno trovato nei decenni successivi vari sviluppi (Ertel 1939; Grubin e Vinogradova, 1949).

Un contributo particolare alla pressione nel contatto, di natura extraviscosa, può essere fornito da fluidi con proprietà viscoelastiche. Sotto l'azione di stress sufficientemente elevati si possono originare, con questi fluidi, sforzi normali di tipo elastico che si sommano agli effetti viscosi. La rilevanza che queste proprietà possono assumere per la lubrificazione è molto legata al contesto operativo.

Altri meccanismi mediante i quali i fluidi possono contribuire alla generazione di una pressione tra due superfici (cuneo di densità, cuneo di viscosità, espansione locale) sono di scarso impatto sulla lubrificazione.

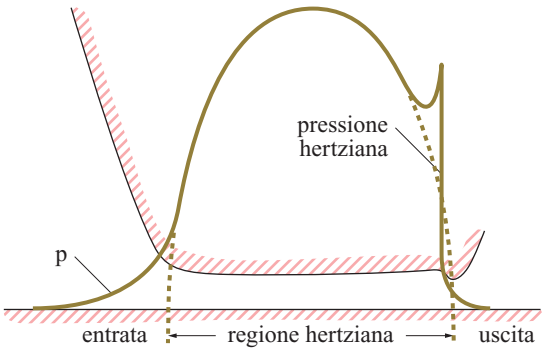


fig. 5. Pressione del lubrificante (p) in un contatto elastoidrodinamico.

Aspetti chimico–fisici e chimici

Intervengono in situazioni in cui le superfici sono poco distanziate e possono verificarsi contatti tra le asperità superficiali. In tali condizioni il lubrificante può intervenire nel processo di lubrificazione anche tramite sottili film superficiali, alla cui formazione esso può contribuire attraverso le proprietà chimiche o chimico-fisiche.

Questa azione del lubrificante può espletarsi mediante una varietà di meccanismi, talvolta alquanto complessi, che possono essere richiamati brevemente solo con le necessarie semplificazioni.

Strati superficiali di lubrificanti si possono formare per effetto delle forze di Van der Waals tra le molecole polari del lubrificante e le superfici solide. Si formano così degli strati ordinati costituiti da molecole ancorate con una estremità alle superfici (adsorbimento fisico), che possono scorrere facilmente tra loro. Tale proprietà (talvolta attribuita a una proprietà indicata come untuosità) è posseduta in maniera più o meno accentuata da tutti i lubrificanti liquidi, ma può essere esaltata con l'uso di specifici additivi. Questi sono costituiti da molecole a lunga catena, provviste di una testa polare (per esempio acidi grassi, esteri e ammidi) mediante la quale si ancorano per adsorbimento chimico con gli ossidi metallici delle superfici, mantenendo inalterata la restante parte della molecola. Ne derivano strati di elevato scorrimento che producono basso attrito (coefficiente di attrito 0,05-0,10), creando opposizione allo schiacciamento. La resistenza di questi strati è tuttavia limitata a valori bassi o moderati di carico e di temperatura.

Analoghi meccanismi di scorrimento a strati si possono incontrare anche con alcuni lubrificanti solidi. In questi casi però il basso attrito è legato alla facile sfaldabilità di alcuni piani del reticolo cristallino (per esempio grafite, solfuro di molibdeno, nitruro di boro e altri) o all'effetto di un profilo molecolare levigato (per esempio teflon, polietilene ad alta densità). Questi lubrificanti presentano in genere difficoltà per una forte adesione alla superficie del solido sottostante.

Film sottili più resistenti sono prodotti da alcuni additivi di comune impiego in oli e grassi lubrificanti, noti come antiusura. Si tratta di composti contenenti zolfo, fosforo e metalli, di stabilità termica limitata che, per effetto della temperatura originata dall'attrito, si decompongono formando sulle superfici una pellicola protettiva. Questa è generalmente costituita da materiale amorfo che, pur con qualche resistenza allo scorrimento (coefficiente di attrito 0,08-0,12), è comunque in grado di sostenere la lubrificazione fino a condizioni di temperatura e di carico di media entità.

Strati superficiali ancor più resistenti, in grado di funzionare in condizioni severe, si possono formare con lubrificanti contenenti additivi detti *per estreme pressioni* (Extreme Pressure, EP). La capacità di questi composti,

che contengono zolfo, cloro e fosforo, di consentire la lubrificazione in condizioni estreme, deriva dalla tendenza a reagire con il metallo delle superfici, per formare, alle elevate temperature del contatto, sali inorganici con elevati punti di fusione (600-700 °C).

Lubrificanti con diverso stato di aggregazione

I lubrificanti maggiormente utilizzati sono liquidi; non mancano tuttavia situazioni in cui può risultare conveniente l'impiego di lubrificanti che sfruttano proprietà legate a un diverso stato di aggregazione.

Lubrificanti gassosi

Sono i lubrificanti più semplici e di minor viscosità, che possono essere costituiti da gas di diverso tipo come aria, azoto, ossigeno, elio. L'ampio campo di temperatura in cui mantengono invariato lo stato di aggregazione e la loro elevata stabilità conferiscono a questi lubrificanti alcuni vantaggi rispetto a quelli liquidi. Possono essere applicati a temperature molto basse (alcuni gradi kelvin) o molto elevate (anche oltre 400-500 °C); inoltre non presentano rischi di contaminazione, caratteristica che li rende particolarmente interessanti per l'impiego nell'industria alimentare, farmaceutica ed elettronica.

La loro bassa viscosità, sensibilmente inferiore a quella dei liquidi, determina, nella lubrificazione aerostatica o aerodinamica, valori di attrito estremamente contenuti. L'impiego dei gas risulta particolarmente vantaggioso nella lubrificazione di cuscinetti ad alto numero di giri (superiori a 15.000 giri/min), ove possono operare senza problemi legati all'eccessiva produzione di calore. Inoltre poiché, diversamente dai liquidi, la loro viscosità aumenta con l'aumentare della temperatura, non perdono la capacità di sostenere il carico per surriscaldamento.

Alla bassa viscosità dei gas si accompagna anche una capacità portante piuttosto scarsa (nei cuscinetti aerodinamici non supera 0,7 kg/cm^2), aspetto che, quando necessario, viene migliorato in sede di progettazione con dimensioni dei cuscinetti significativamente più grandi di quelli per liquidi. A questo scopo vengono talvolta usati cuscinetti ibridi (aerodinamici/aerostatici misti), ove la capacità di sostenere il carico è generata, oltre che dal movimento delle superfici, anche dalla pressione con cui è fornito il gas.

Lubrificanti liquidi

Sono i lubrificanti di gran lunga più diffusi, che possono soddisfare le esigenze di moltissime applicazioni. Ciò è reso possibile dal fatto che possiedono proprietà grazie alle quali possono svolgere, in aggiunta alla funzione di lubrificare, anche una serie di altre desiderabili funzioni secondarie. Il loro impiego copre un intervallo di temperature che, considerando le diverse classi di prodotti, si estende da circa −60 a circa 250 °C.

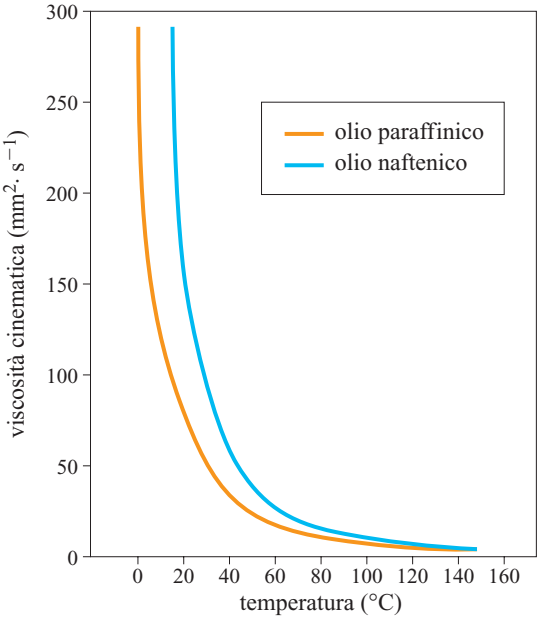


fig. 6. Diagramma viscosità-temperatura di lubrificanti liquidi.

Possono estrinsecare la loro funzione lubrificante in tutti i modi di lubrificazione: a film fluido, limite e mista.

Nella lubrificazione limite le prestazioni sono sostanzialmente determinate dalle proprietà chimiche e chimico-fisiche possedute naturalmente dai liquidi di base o, come avviene più frequentemente, conferite mediante l'aggiunta di specifici additivi. In tali condizioni, a seguito di reazioni chimiche talvolta complesse, questi lubrificanti formano sulle superfici una pellicola che costituisce l'ultima barriera per impedire il contatto tra i solidi. L'efficacia e la resistenza di tale barriera dipendono in grande misura dalla capacità dei componenti di sviluppare un'adeguata reattività in rapporto alla severità delle condizioni operative e di evitare nel contempo reazioni di competizione interna.

Nella lubrificazione a film fluido, invece, l'influenza che il lubrificante liquido esercita attraverso le proprietà reologiche appare più semplice. Un ruolo primario è svolto, in questo caso, dalla viscosità, che risente dell'azione di tre parametri fisici normalmente presenti nei contatti: temperatura, pressione e sforzo di taglio (*shear stress*). Di particolare rilievo per la lubrificazione è l'effetto della temperatura (**fig. 6**), al cui aumento corrisponde una riduzione di viscosità, con perdita di capacità di sostenere il carico e maggiori rischi di grippaggio. La pressione, invece, esercita sulla viscosità un effetto opposto (**fig. 7**), con conseguenze favorevoli per la lubrificazione, che sono maggiormente avvertite nei contatti elastoidrodinamici. Nei confronti dello shear stress poi, i lubrificanti liquidi presentano una risposta differenziata, in dipendenza dalle interazioni presenti tra

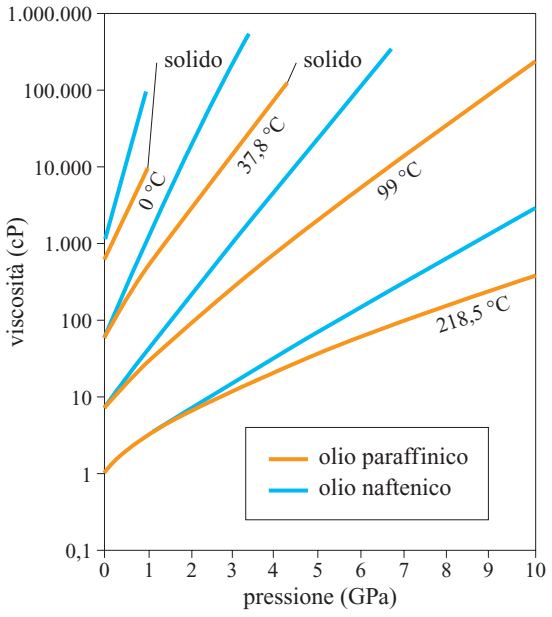


fig. 7. Diagramma viscosità-pressione di lubrificanti liquidi.

le molecole (**fig. 8**). Liquidi semplici, poco associati (per esempio oli base contenenti anche additivi di tipo semplice) presentano una viscosità insensibile allo shear stress (comportamento newtoniano), mentre liquidi associati o con altre significative interazioni molecolari (per esempio oli a bassa temperatura, oli contenenti polimeri modificatori di viscosità) hanno viscosità decrescenti con l'aumentare dello shear stress, secondo un tipico andamento a sigmoide (comportamento pseudoplastico); tale effetto, che determina una riduzione della capacità di sopportare il carico, si mantiene reversibile entro certi limiti di stress, superati i quali può diventare permanente. La dipendenza della viscosità dalle suddette variabili è definita da note relazioni matematiche.

L'importanza della viscosità per i lubrificanti liquidi è dimostrata dal fatto che questa proprietà è alla base di importanti sistemi di classificazione che consentono

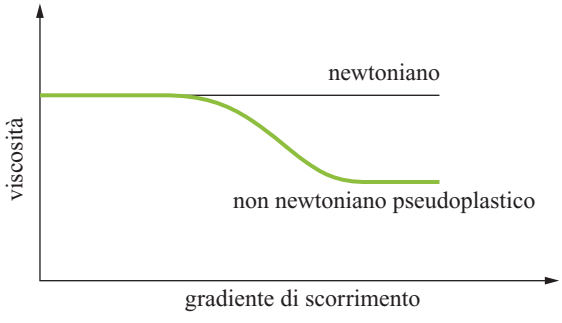


fig. 8. Dipendenza della viscosità di lubrificanti liquidi dallo sforzo di taglio.

di individuare le caratteristiche viscosimetriche appropriate per l'utilizzo corretto dei lubrificanti in alcune applicazioni rilevanti (motori, trasmissioni, macchinari industriali).

Tra le funzioni secondarie che possono svolgere i lubrificanti liquidi hanno importanza anche l'asportazione di calore, la capacità di rimuovere e trasportare frammenti di usura o di contaminanti solidi e la preservazione dalla corrosione. La loro importanza emerge nella lubrificazione di macchine termiche, ove il calore generato dai processi termodinamici sovrasta quello prodotto dall'attrito. A questo riguardo sono esempi applicativi ben noti i sistemi a lubrificazione forzata presenti nei motori a combustione interna degli autoveicoli.

Altre caratteristiche secondarie basate sulle proprietà dei lubrificanti liquidi (per esempio compatibilità con dispositivi ausiliari antinquinamento, biodegradabilità, demulsività, ininfiammabilità, rigidità dielettrica, resistenza alle radiazioni) assumono rilievo per lo più in relazione ad applicazioni specifiche.

Un aspetto essenziale per il buon funzionamento dei lubrificanti liquidi riguarda il mantenimento delle prestazioni per il tempo richiesto. La capacità di questi lubrificanti di rispondere adeguatamente alle esigenze di durata nelle diverse applicazioni è primariamente determinata dalle loro caratteristiche di stabilità, sia chimica (inerzia termica, resistenza all'ossidazione e all'idrolisi, compatibilità con vari materiali) sia fisica (scarsa tendenza all'evaporazione e alla formazione di emulsioni e di dispersioni).

Un aspetto di importanza fondamentale per la tecnologia dei lubrificanti liquidi, che sta alla base di molteplici estensioni applicative, riguarda la possibilità di trattamento con additivi chimici. Molte delle proprietà di questi lubrificanti possono essere migliorate o impartite mediante additivi. Senza additivi la maggior parte delle moderne richieste di lubrificazione non potrebbe essere adeguatamente soddisfatta. La gamma dei composti disponibili a questo riguardo è piuttosto ampia, anche se le loro funzioni si riducono a un numero relativamente limitato. Tra le principali sono da ricordare: la riduzione dell'usura, il controllo dell'attrito, l'aumento della resistenza all'ossidazione, il contenimento della formazione di depositi sulle parti lubrificate, la minimizzazione della ruggine e della corrosione, la variazione della viscosità e la sua riduzione con la temperatura, il miglioramento dello scorrimento a freddo, l'abbassamento della tendenza alla schiuma.

L'ampia varietà delle proprietà esibite dai lubrificanti liquidi non basta, in molti casi, ad assicurare le prestazioni in servizio. In molte applicazioni, sia per l'autotrazione sia per il macchinario industriale, le prestazioni sono garantite solo dal superamento di specifici programmi di prove correlati con il reale servizio. Tali programmi, che spesso prevedono un consistente numero

di prove, sono definiti nell'ambito di sistemi generali di classificazione prestazionale o di specifiche di singoli costruttori di hardware meccanico. Particolarmente impegnativi per livello di complessità, durata e costo, sono i programmi di prove motoristiche per la qualificazione di lubrificanti per i motori degli autoveicoli.

Per quanto riguarda l'origine dei lubrificanti liquidi, questi sono costituiti, per la maggioranza, da oli contenenti miscele di idrocarburi derivati dal petrolio, generalmente addizionati con opportuni additivi. La larga prevalenza di questi prodotti trova giustificazione nelle loro soddisfacenti prestazioni generali, nel costo relativamente contenuto e nella facile disponibilità. Per impieghi speciali o particolarmente esigenti, ove le necessità di servizio giustificano costi maggiori, possono essere preferiti oli di origine sintetica.

Infine è opportuno ricordare la flessibilità applicativa dei lubrificanti liquidi. Il fatto che questi prodotti possano sottostare a trattamenti di vario tipo (pompaggio, filtraggio, raffreddamento, nebulizzazione, ecc.), li rende adatti all'impiego in sistemi di lubrificazione diversi, tra i quali si possono citare, oltre ai già menzionati sistemi a lubrificazione forzata, i sistemi a bagno d'olio (per esempio ruote dentate a bassa velocità), i sistemi a nebbia d'olio (per esempio ingranaggi ad alta velocità) e i sistemi a sbattimento (per esempio motori lenti o a media velocità).

Lubrificanti semisolidi (grassi lubrificanti)

Sono prodotti solidi o semisolidi costituiti da una fase liquida, generalmente un olio lubrificante, e da una fase solida dispersa, con funzione ispessente.

L'agente ispessente serve a conferire la necessaria consistenza, proprietà grazie alla quale il grasso può rimanere da solo nell'organo da lubrificare senza necessità di dispositivi ausiliari, impedendo, se necessario, l'ingresso di sostanze dannose, come polvere e umidità, dall'ambiente circostante.

Come ispessenti si usano generalmente saponi di litio, sodio, calcio e alluminio. Il loro impiego è limitato dai cambiamenti di fase (fusioni) che si verificano alle diverse temperature. Per applicazioni ad alte temperature vengono usati ispessenti ad alto punto di fusione (saponi complessi, poliurea, bentone).

Di particolare rilievo per la lubrificazione sono le proprietà reologiche. Sotto questo punto di vista i grassi sono caratterizzati da un comportamento di tipo plastico, con viscosità che diminuisce con l'aumentare dello shear stress, una volta superata una soglia minima di sollecitazione. Possono essere sensibili, oltre che all'intensità della sollecitazione, anche alla sua durata, mostrando effetti dipendenti dal tempo (tixotropia).

Alla funzione lubrificante contribuisce in modo sostanziale la componente oleosa, costituita nella maggior parte dei casi da prodotti di origine petrolifera; per impieghi che si estendono nel campo delle basse e alte temperature e per applicazioni particolari vengono usati anche oli sintetici.

Come i lubrificanti liquidi anche i grassi possono contenere additivi capaci di impartire al prodotto proprietà speciali (per esempio antiusura, antiruggine, antiossidanti).

La principale utilizzazione dei grassi lubrificanti è nella lubrificazione di elementi di macchine come cuscinetti, ingranaggi e giunti, presenti in macchinari industriali, motori, macchine utensili e altro.

Lubrificanti solidi

Sono normalmente caratterizzati da una struttura dello strato superficiale costituita da aggregati lamellari che possono scorrere facilmente gli uni sugli altri (per esempio grafite, bisolfuro di molibdeno, azoturo di boro, ioduro di cadmio, borace, talco) o da conformazioni molecolari levigate (teflon, polietilene ad alta densità).

Vengono per lo più usati in condizioni in cui non è possibile usare oli o grassi lubrificanti, come per esempio sotto vuoto o a temperature molto elevate o in presenza di intense radiazioni. La loro efficienza può essere condizionata dalla difficoltà di mantenere uno strato sufficiente per la lubrificazione. La protezione dall'usura può talvolta risultare limitata, in conseguenza del fatto che la rottura del film non è autorigenerante, come succede, invece, con i lubrificanti liquidi. Dal punto di vista applicativo possono essere impiegati con modalità diverse, ognuna delle quali non è totalmente esente da problemi. Così, per esempio, possono essere usati in sospensione (problemi di stabilità), in paste (difficoltà di penetrazione in spazi ristretti), con pretrattamento dei materiali in forno ad alta temperatura (lo strato lubrificante, quando usurato, non può essere ricostituito).

8.4.2 Funzioni e prestazioni dei lubrificanti per autotrazione

Lubrificanti motore

Funzioni per motori a quattro tempi

La lubrificazione di questi motori avviene mediante un olio con caratteristiche specifiche, definito olio motore. Cambio e trasmissione hanno in genere una lubrificazione separata. Elementi importanti del circuito di lubrificazione di un motore a quattro tempi sono: la pompa di mandata che garantisce una portata di olio idonea, una valvola di regolazione che limita la pressione massima del circuito, il filtro che sottrae all'olio sia le particelle d'usura sia parte dei depositi che si formano per effetto della combustione. In casi particolari può essere presente anche un radiatore per il raffreddamento dell'olio. In motori sottoposti a forti sollecitazioni centrifughe,

come nel caso di motori per competizioni o aeronautici, l'olio è posto in appositi serbatoi dove viene ricondotto, dopo aver lubrificato i vari organi, mediante più pompe poste nel carter (motori a carter secco).

Per limitare al massimo il consumo di olio, i motori sono generalmente dotati di diversi dispositivi quali: fasce raschia-olio sui pistoni, tenute a labbro sull'albero motore, gommini sugli steli valvola, sistemi di separazione dell'olio dai gas di combustione che trafilano nel carter (blow-by).

All'olio motore sono affidate varie importanti funzioni e in particolare:

- assicurare in qualsiasi condizione di esercizio un adeguato film lubrificante sui vari accoppiamenti meccanici in movimento relativo, allo scopo di limitare la resistenza d'attrito e l'usura delle superfici;
- assicurare la pulizia del motore prevenendo la formazione di depositi e il loro accumulo in parti critiche;
- disperdere gli eventuali depositi formati e le particelle di usura, convogliandoli verso il filtro;
- proteggere le parti del motore dalla formazione di ruggine e dall'attacco chimico dei prodotti acidi derivanti dalla combustione;
- favorire la tenuta tra le fasce elastiche del pistone e la camicia del cilindro in modo da garantire il mantenimento del giusto rapporto di compressione ed evitare che i prodotti di combustione raggiungano l'olio nella coppa deteriorandolo precocemente;
- integrare il sistema di raffreddamento del motore in modo da mantenere la temperatura entro i limiti corrispondenti al corretto funzionamento;
- evitare la formazione di bolle e di schiuma nell'impianto di lubrificazione che possono rendere irregolare l'erogazione dell'olio agli organi da lubrificare;
- garantire per un adeguato periodo di esercizio le proprietà sopra descritte.

Le caratteristiche richieste vengono conferite sia attraverso l'impiego di basi lubrificanti adeguate, sia con l'impiego di opportuni additivi.

Funzioni per motori a due tempi

La tipologia dei motori a due tempi, così definiti perché operano con un ciclo composto da una fase utile e una di sostituzione della carica, è molto diversa in funzione dei campi di impiego. Si va infatti dai piccoli motori di ciclomotori, motoseghe e generatori portatili ai monumentali motori diesel marini che equipaggiano superpetroliere e navi portacontainer.

Nel caso dei piccoli motori a due tempi, il lubrificante (a perdere) è miscelato al carburante e deve assolvere ai seguenti compiti: garantire la pulizia del motore per prevenire la formazione di depositi (sulla candela per evitare mancate accensioni, sul pistone per garantirne la corretta tenuta, sulle luci di ammissione o di scarico per prevenire perdite di potenza dovute alla loro ostruzione); garantire la lubrificazione dei vari accoppiamenti e in particolare di quello pistone-cilindro e dei cuscinetti di banco e di biella.

Per quanto riguarda i grandi motori diesel a due tempi destinati all'uso marino bisogna considerare che essi richiedono l'impiego di due diversi lubrificanti. Il primo per la lubrificazione del manovellismo, cioè dei meccanismi che consentono la conversione del moto alternativo nel moto rotativo dell'albero motore, e il secondo per la lubrificazione (a perdere) dei cilindri. Mentre per il primo tipo di lubrificante non sono richieste proprietà speciali, nel caso del secondo la principale proprietà deve essere la capacità di neutralizzare i prodotti acidi della combustione, in quanto questi motori generalmente sono alimentati con carburanti a elevato contenuto di zolfo.

Classificazione viscosimetrica e specifiche prestazionali

La viscosità ha una influenza diretta su alcune prestazioni degli oli motore. La SAE (Society of Automotive Engineers) ha definito un sistema di classificazione degli oli motore (SAE J 300) secondo categorie basate su misure di viscosità a bassa e ad alta temperatura (**tab. 1**).

Le misure a bassa temperatura individuano gradazioni viscosimetriche contrassegnate da un numero con il suffisso W (Winter). Queste gradazioni classificano gli oli che consentono ai motori in buone condizioni di raggiungere la velocità di trascinamento minima per l'avviamento in un certo intervallo di temperatura. Quanto più è basso il grado W, tanto minore è la temperatura di avviamento. La viscosità che è correlata alla velocità di trascinamento è misurata con apposito viscosimetro denominato Cold Cranking Simulator (CCS).

Un lubrificante con la viscosità adatta per l'avviamento del motore può risultare poco pompabile, in quanto non arriva a lubrificare le diverse parti del motore nel tempo e nella quantità richiesti, con rischi di usura. Una sufficiente pompabilità dell'olio è assicurata da misurazioni eseguite mediante un particolare viscosimetro, denominato Mini-Rotary Viscometer (MRV).

Le gradazioni ad alta temperatura sono correlate con la lubrificazione del motore in condizioni di normale funzionamento e vengono definite sulla base di misure di viscosità cinematica a 100 °C e di viscosità dinamica a elevati gradienti di scorrimento (shear) a 150 °C.

Quando un lubrificante, per le sue caratteristiche di viscosità cinematica a 100 °C e di viscosità CCS, rientra nei gradi SAE X e nei gradi SAE Y W, può essere classificato come YW-X (per esempio 15W-40 se ha una viscosità a 100 °C compresa tra 12,5 e 16,3 $mm^2 s^{-1}$, una viscosità a −20 °C inferiore a 7.000 mPa·s, una pompabilità a −25 °C e una viscosità ad alta temperatura e alto shear maggiore di 3,7 mPa·s). I lubrificanti che rispondono a tali caratteristiche si dicono multigradi e

tab. 1. Classificazione viscosimetrica degli oli motore (SAE J 300)

Gradi SAE	Avviamento		Pompabilità		Viscosità ad alta temperatura		
	Viscosità CCS max (cP)	Temperatura (°C)	Viscosità MRV max (cP)	Temperatura (°C)	Viscosità a 100 °C ($mm^2 \cdot s^{-1}$)		Viscosità a 150 °C e $10^6 s^{-1}$ (mPa·s)
					min.	max.	min
0W	6.200	−35	60.000	−40	3,8	–	
5W	6.600	−30	60.000	−35	3,8	–	
10W	7.000	−25	60.000	−30	4,1	–	
15W	7.000	−20	60.000	−25	5,6	–	
20W	9.500	−15	60.000	−20	5,6	–	
25W	13.000	−10	60.000	−15	9,3	–	
20	–	–	–	–	5,6	<9,3	2,6
30	–	–	–	–	9,3	<12,5	2,9
40	–	–	–	–	12,5	<16,3	2,9 (0W-40, 5W-40, 10W-40)
40	–	–	–	–	12,5	<16,3	3,7 (15W-40, 20W-40, 25W-40)
50	–	–	–	–	16,3	<21,9	3,7
60	–	–	–	–	21,9	<26,1	3,7

garantiscono prestazioni viscosimetriche soddisfacenti (avviamento a freddo e protezione ad alta temperatura) in un intervallo di temperature molto ampio.

In aggiunta alla classificazione viscosimetrica, gli oli motore devono rispondere a opportune specifiche prestazionali. Tali specifiche vengono richiamate dai costruttori nelle pubblicazioni tecniche (manuali, libretti di uso e manutenzione, ecc.) e riportate dai produttori di lubrificanti sulle confezioni e sulla documentazione tecnica. Ciò consente all'utilizzatore finale la scelta appropriata del lubrificante in funzione delle prescrizioni per il proprio macchinario e dell'offerta da parte dei produttori di lubrificante.

Ciascuna specifica prestazionale per gli oli motore contempla tipicamente più serie di valutazioni, di cui il nucleo fondamentale è costituito dalle cosiddette prove motoristiche che simulano l'esercizio.

Sistema di classificazione statunitense

Negli Stati Uniti la classificazione prestazionale dei lubrificanti è il risultato dell'attività comune di alcuni enti: l'ASTM (American Society for Testing and Materials), che cura i metodi e le procedure di prova; il SAE (Society of Automotive Engineers) e l'EMA (Engine Manufacturers Association), società di costruttori, che definiscono le esigenze delle nuove specifiche; l'API (American Petroleum Institute) che pubblica il sistema di classificazione; l'ACC (American Chemistry Council), organismo di categoria dei produttori di additivi. L'API ha anche l'importante compito di amministrare e rilasciare le licenze d'uso del marchio.

L'Engine Oil Licensing and Certification System (EOLCS) è un sistema di certificazione che descrive le regole da seguire per la qualificazione dei lubrificanti motore e gestisce il rilascio di marchi di conformità da apporre sulle confezioni: l'API Service Symbol Donut e il Certification Mark Starburst.

L'API pubblica sul proprio sito Internet la lista dei lubrificanti per i quali è stata rilasciata la licenza ad apporre il donut e/o lo starburst.

I livelli di prestazione API (API Service Categories) si dividono in livelli per motori a benzina e per motori diesel, contraddistinti rispettivamente dalla lettera S (da Service) e C (da Commercial), poichè tradizionalmente negli Stati Uniti i motori diesel trovano applicazione solo nei veicoli commerciali. Tali lettere sono seguite da una seconda lettera (per esempio, SL) progressiva in funzione delle successive riedizioni; per le categorie C diesel, può inoltre essere presente anche un numero che ne definisce la sfera applicativa.

In aggiunta e a complemento delle categorie di servizio, l'API definisce anche un livello prestazionale Energy Conserving. Per poter rivendicare tale livello, i lubrificanti devono dimostrare proprietà di risparmio di carburante in una prova motoristica a confronto con i risultati ottenuti alla stessa prova da un olio standard di riferimento. Secondo quanto riportato dall'API nell'EOLCS, l'impiego esteso di oli motore che soddisfano tale requisito dovrebbe portare un risparmio complessivo di carburante del parco circolante.

A completamento dell'EOLCS, l'API amministra un programma di monitoraggio dell'effettiva qualità dei lubrificanti immessi sul mercato che hanno riportato il donut.

Sistema di classificazione europeo

L'ACEA (Association des Constructeurs Européens de l'Automobile) pubblica le cosiddette sequenze lubrificanti, che riportano i livelli prestazionali di riferimento per motori a benzina e diesel sia leggeri sia pesanti. Le prime sequenze furono pubblicate nel 1996, ad aggiornamento delle precedenti sequenze CCMC (Comitato Costruttori del Mercato Comune), e vengono aggiornate con cadenza biennale.

Per quanto riguarda le regole di qualificazione, il sistema europeo, denominato EELQMS (European Engine Lubricants Quality Management System) si ispira all'API EOLCS. Al sistema europeo concorrono enti quali il CEC (Coordinating European Council), incaricato di sviluppare e catalogare i metodi di prova, l'ATIEL (Associazione Tecnica Industria Europea Lubrificanti) e l'ACC (American Chemistry Council).

L'ACEA non prevede un proprio marchio né gestisce un sistema di certificazioni. L'elenco degli operatori che ufficialmente, in adesione al sistema EELQMS, si impegnano a rispettarne le regole è pubblicato sul sito Internet dell'ATIEL.

Sistema di classificazione giapponese

I costruttori giapponesi si rifanno in generale alle specifiche americane o a quelle europee a seconda del mercato in cui operano.

Va per altro rilevato che in Giappone sono largamente diffusi i cosiddetti *genuine oils*, venduti dagli stessi costruttori. Le loro caratteristiche sono spesso definite in base a prove motoristiche sviluppate sempre dai costruttori.

Un particolare rilievo ha assunto la classificazione qualitativa JASO (Japanese Automotive Standardizing Organization) relativa agli oli per motoveicoli, che prevede livelli prestazionali per gli oli per motori a due e quattro tempi (rispettivamente FB, FC e FD, MA e MB). Il sistema relativo prevede la possibilità di registrazione con abilitazione a riportare un marchio sulle confezioni e la pubblicazione su sito Internet della lista degli oli registrati.

Specifiche dei costruttori

Molti costruttori prevedono il rilascio di approvazioni formali e la pubblicazione di liste di oli approvati. Ciascun costruttore ha normalmente una serie articolata di specifiche prestazionali, in funzione delle varie motorizzazioni e/o degli intervalli di sostituzione dell'olio.

Trend evolutivi degli oli motore

L'evoluzione degli oli motore segue di pari passo l'evoluzione motoristica ed è pertanto condizionata dal miglioramento delle prestazioni e dalla riduzione delle emissioni.

Riduzione del CO_2 (Protocollo di Kyoto)

Con il Protocollo di Kyoto i paesi industrializzati si impegnano a ridurre per il periodo 2008–12, il totale delle emissioni di gas a effetto serra (CO_2, metano, ossido di azoto, idrofluorocarburi, perfluorocarburi, esafluoro di zolfo; v. cap. 10.2) almeno del 5% rispetto ai livelli del 1990 nel settore dei trasporti. L'Unione Europea ha operato una strategia per ridurre le emissioni di CO_2 dalle autovetture nuove da 186 g/km a 120 g/km, al più tardi entro il 2012, in accordo con le associazioni dei costruttori di autoveicoli dell'Europa, del Giappone e della Corea del Sud.

Riduzione di emissioni degli inquinanti veicolari (normativa comunitaria)

Negli ultimi anni si è assistito a un crescente interesse nei confronti della problematica connessa al particolato emesso da autoveicoli (v. cap. 10.2), principalmente in seguito a una serie di studi tossicologici che individuano una relazione fra l'esposizione al particolato ambientale e gli effetti negativi sulla salute umana.

Un altro problema ambientale di recente attenzione che riguarda le aree urbane e fortemente industrializzate è rappresentato dallo smog fotochimico, un particolare tipo di inquinamento dell'aria che si produce nelle giornate caratterizzate da condizioni meteorologiche di stabilità e di forte insolazione.

L'evidenza degli effetti delle emissioni autoveicolari sull'ambiente e sulla salute umana ha suggerito l'introduzione di opportune normative per regolare le emissioni dei mezzi di trasporto che dipendono dal tipo di veicolo e dal carburante utilizzato.

Tutti i veicoli debbono essere attualmente omologati in base a normative comunitarie che prevedono limiti di emissione allo scarico che divengono sempre più restrittivi. I limiti EURO 4 si applicano dal 2005 ai veicoli di nuova omologazione e dal 2006 a tutti quelli di nuova immatricolazione.

Lubrificanti ed emissioni

L'olio lubrificante influenza le emissioni allo scarico in primo luogo attraverso la sua influenza sui consumi

di combustibile (fuel economy) per le ricadute dirette sui quantitativi di CO_2 emessi. Altre forme più dirette di contributo alle emissioni si hanno attraverso la quantità di olio che trafila verso la camera di combustione o direttamente allo scarico (comunemente indicata con il termine consumo d'olio), attraverso la sua possibilità e capacità di bruciare in camera di combustione stessa, attraverso i fenomeni di assorbimento e desorbimento del combustibile e infine più indirettamente attraverso l'impatto sui sistemi di post-trattamento dei gas di scarico.

Fuel economy

In un motore a combustione interna l'energia fornita dal carburante si distribuisce secondo uno schema tipico: circa il 15% della risorsa energetica del combustibile risulta effettivamente sfruttabile per il veicolo; circa il 30% viene dissipata nel raffreddamento dei cilindri; circa il 30% viene persa nello scarico dei gas esausti; circa il 25% viene assorbita dai fenomeni di attrito meccanico che si verificano negli accoppiamenti del motore.

L'attrito responsabile di tali riduzioni di efficienza si origina in differenti condizioni operative di carico, velocità e temperatura che determinano, nelle parti del motore interessate, combinazioni di lubrificazione idrodinamica, mista e limite.

Il lubrificante può esercitare un ruolo significativo nella limitazione di questi fenomeni contribuendo efficacemente alla cosiddetta fuel economy (FE), che rappresenta in campo motoristico il parametro di riferimento per la valutazione del risparmio energetico.

Due opzioni principali si offrono per la riduzione dell'attrito: la prima prevede l'utilizzo di oli fluidi (a bassa viscosità) quando prevale la lubrificazione a film fluido (tipica dei cuscinetti), con elevato spessore di film d'olio; la seconda l'impiego di additivi chimici, detti Friction Modifiers (FM), attivi nei regimi misti e limite (tipici della distribuzione), con film molecolari.

Nel primo caso la selezione delle basi lubrificanti risulta cruciale. Quali fattori rilevanti nei confronti dell'attrito emergono le caratteristiche reologiche: la viscosità cinematica, l'indice di viscosità, la viscosità HTHS (High Temperature High Shear, ad alta temperatura e alti shear), il coefficiente viscosità/pressione. Inoltre, soprattutto durante l'invecchiamento dell'olio, anche altre proprietà del fluido risultano significative: in particolare la volatilità e la stabilità termossidativa.

Nel secondo ambito invece, diventano fondamentali l'adozione di composti Friction Modifiers appropriati e il controllo delle interazioni additivo/additivo e additivo/sistema di basi.

Le determinazioni quantitative di FE sono di carattere comparativo rispetto a oli standard di qualità media e sono sensibili sia ai cicli di prova sia al tipo di motorizzazione utilizzato.

Negli Stati Uniti si attribuiscono riconoscimenti di eccellenza a lubrificanti che, su tutto il ciclo di vita, superano il 2% di risparmio di carburante, mentre in Europa la soglia di qualificazione per gli oli nuovi è posta al 2,5%. In particolari condizioni di esercizio (cicli urbani e bassa temperatura) tuttavia i lubrificanti fluidi, rispetto a tecnologie più tradizionali, possono raggiungere anche livelli di FE del 4-5%.

Consumo di olio

Il consumo di olio è da sempre oggetto di molta attenzione da parte degli utenti, ed è molto spesso considerato tra i principali parametri di giudizio della bontà di un prodotto. Ultimamente il consumo ha assunto un'importanza maggiore per le sue implicazioni sulle emissioni allo scarico.

Tralasciando le eventuali perdite dalle tenute verso l'esterno, che hanno ripercussioni ambientali ma non influenzano le emissioni allo scarico, esistono principalmente tre fonti di trafilamento dell'olio che ne determinano la presenza allo scarico: la prima fonte è costituita dalla zona delle valvole, la seconda dalla zona della segmentazione, la terza è legata alla eventuale presenza di organi ausiliari come il turbocompressore, ampiamente diffuso soprattutto nei motori diesel.

Il lubrificante, oltre a influenzare indirettamente il consumo di olio in funzione delle sue capacità di preservare nel tempo il buono stato del motore, ha un'azione più diretta sul fenomeno, legata alla sua volatilità e alle caratteristiche reologiche.

Effetto diretto sulle emissioni

Il lubrificante influenza tutte le emissioni regolamentate in quanto è in grado di contribuire alla frazione carboniosa del particolato (soot), alla frazione organica volatile/solubile (VOF/SOF, Volatile Organic Fraction/Soluble Organic Fraction) e agli idrocarburi incombusti o parzialmente combusti; attraverso la FE è inoltre in grado di influenzare le emissioni di NO_x e di CO_2.

Ovviamente il lubrificante condiziona lo stato del motore nel tempo, relativamente alla formazione di depositi e usura, e la sua capacità di contrastare tali fenomeni si traduce nella possibilità di mantenere il livello originario delle emissioni gassose e di particolato. Lo stesso invecchiamento dell'olio lubrificante può comportare effetti negativi sulle emissioni allo scarico. Anche la quantità di solfati presenti nel particolato dipende in qualche misura dal lubrificante; la presenza di composti dello zolfo nei lubrificanti contribuisce infatti alla presenza di solfati nelle emissioni, come è stato riscontrato utilizzando gasoli virtualmente privi di zolfo.

Diversi studi dimostrano che l'impiego di oli di più basso grado viscosimetrico SAE, rispetto alle gradazioni tradizionali, e di composizione sintetica può assicurare la riduzione contemporanea delle emissioni di

particolato e di NO_x. In alcuni casi è stato sperimentalmente dimostrato come autovetture diesel con livelli di emissioni di particolato e NO_x posizionati in prossimità dei limiti massimi siano rientrate agevolmente nei limiti ricorrendo all'impiego di oli fluidi sintetici.

La riduzione delle temperature allo scarico, conseguente alla diminuzione del consumo specifico reso possibile dall'uso di oli fluidi, può tuttavia avere influenza negativa sulla efficienza dei catalizzatori, soprattutto nella delicata fase di attivazione light-off degli stessi. L'ottimizzazione del motore in funzione delle caratteristiche reologiche dell'olio riveste particolare importanza alla luce dell'esigenza di mantenere l'efficienza dei sistemi di conversione catalitica.

Per finire la disamina degli effetti del lubrificante sulle emissioni si accenna al fatto che le caratteristiche sia chimiche sia fisiche dell'olio possono influire sulla solubilità e sulla diffusione del carburante nel lubrificante. Questo fenomeno regola la capacità dello spessore di film d'olio presente sulle pareti del cilindro di assorbire combustibile nella fase di compressione e rilasciarlo durante l'espansione, ove non ha più la possibilità di bruciare. Nei motori diesel il fenomeno può regolare anche la capacità del particolato di arricchirsi in combustibile incombusto.

Sebbene i moderni oli lubrificanti contengano concentrazioni di idrocarburi polinucleari aromatici (PNA, Polynuclear Aromatics hydrocarbons) molto basse, in esercizio essi possono assorbire PNA prodotti dalla combustione.

Effetto indiretto sulle emissioni

Recentemente l'associazione europea costruttori e alcune case automobilistiche che emanano specifiche sui lubrificanti hanno deliberato nuove categorie di lubrificanti con limiti chimici massimi su ceneri, zolfo e in alcuni casi fosforo, per tenere conto in primo luogo delle esigenze dei motori diesel dotati di filtri antiparticolato (DPF, Diesel Particulate Filters), ma anche di altri sistemi attuali e futuri.

La presenza di prodotti organometallici nel lubrificante è, come accennato in precedenza, responsabile della lenta, ma progressiva occlusione nel tempo dei DPF. La limitazione delle ceneri pone delle restrizioni su alcuni tipi di additivi come detergenti e antiusura che contengono composti organometallici. Tali richieste hanno originato ricerche verso componenti *ashless* di pari efficacia.

La riduzione delle ceneri si accompagna a quella di zolfo e fosforo, anche in considerazione del fatto che la sua limitazione provoca una automatica ripercussione sugli additivi organometallici contenenti questi ultimi elementi.

Lo zolfo è imputato soprattutto di ridurre l'efficacia delle trappole per NO_x, imponendone la più frequente rigenerazione, ma in realtà causa l'avvelenamento reversibile di tutti i tipi di catalizzatore.

La presenza dello zolfo nei lubrificanti di uso attuale deriva dal contributo delle basi, se di tipo minerale, e di alcuni dei componenti del pacchetto di additivi. Gli oli minerali o con minima presenza di basi sintetiche possono presentare un contenuto di zolfo fino a 7.000-8.000 ppm, mentre gli oli con basi totalmente sintetiche o non convenzionali possono presentare un tenore di 2.000-4.000 ppm. Si evidenzia pertanto l'importanza emergente della limitazione dello zolfo nei lubrificanti in presenza dei sistemi di post-trattamento dei gas di scarico che si rivelano sensibili all'avvelenamento da zolfo. Il primo passo in tal senso è chiaramente connesso all'impiego di basi lubrificanti prive di zolfo, il che emarginerà in un prossimo futuro le basi minerali tradizionali a vantaggio delle basi sintetiche e di quelle minerali soggette a trattamenti di hydrocracking e isomerizzazione. Un ulteriore contributo alla riduzione dello zolfo sarà però anche richiesto all'additivazione dell'olio, il che si traduce nella limitazione di impiego di una serie di additivi di diversa funzionalità (detergenti, antiusura, antiossidanti, antiattrito) contenenti zolfo.

L'unica fonte di fosforo è rappresentata dal lubrificante e più in particolare dagli additivi antiusura (ditiofosfati di zinco) in esso contenuto. Gli oli tradizionali presentano un contenuto di fosforo generalmente intorno a 1.000-1.200 ppm. Il problema dell'interferenza del fosforo sulla funzionalità dei sistemi catalitici di trattamento dei gas esausti è stato portato all'attenzione già da diversi anni ma la presenza di questo elemento è giustificata dal suo importante ruolo di antiusura. La limitazione di questo elemento pone la richiesta di additivi antiusura alternativi caratterizzati dalla assenza di fosforo e possibilmente di zolfo.

Evoluzione delle richieste prestazionali tradizionali

Il raggiungimento di proprietà di compatibilità nei confronti dei sistemi di post-trattamento dei gas di scarico deve coesistere sia con esigenze prestazionali tradizionali, sia con aspetti emergenti dalle più recenti evoluzioni tecnologiche dei motori.

Nel campo dei motori a benzina lo sviluppo di motori a iniezione diretta comporta come conseguenza una possibile maggiore contaminazione dell'olio da parte del combustibile, a causa del contatto diretto tra il carburante iniettato e lo spessore di film d'olio sulle pareti del cilindro. La fluidodinamica della camera di combustione sembra tuttavia avere un ruolo importante nel favorire od ostacolare il contatto oltre che nel determinare la corretta preparazione della miscela.

Un altro problema che sembra emergere relativamente a questa tipologia di motori è rappresentato dall'aumento dei depositi sulle valvole di aspirazione, sulle quali viene meno l'azione parzialmente dilavante operata

dall'iniezione di carburante verso le valvole stesse, che avviene invece nei motori a iniezione nel collettore. Poiché l'olio lubrificante che trafila lungo le valvole resta uno dei maggiori imputati della formazione dei depositi sulle stesse, aumentano le richieste da parte dei costruttori verso oli con un basso contributo ai depositi sulle valvole.

Nel campo dei motori diesel per autovetture si è assistito negli ultimi anni a una lievitazione della potenza specifica consentita dai nuovi impianti di iniezione ad alta pressione (*common rail* e iniettori-pompa). La maggiore potenza specifica implica un maggiore carico termico sul pistone, che a sua volta si traduce in una richiesta nei confronti dell'olio di migliori prestazioni antiossidanti e detergenti.

Le elevate pressioni di iniezione, accompagnate da una sovralimentazione spinta, hanno inoltre determinato un incremento delle sollecitazioni meccaniche sul pistone, sulle fasce elastiche e sui cuscinetti. Conseguentemente, all'olio vengono richieste migliore ottimizzazione delle caratteristiche reologiche reali (indice di viscosità, HTHS, coefficiente viscosità-pressione) e migliori proprietà antiusura.

Ai fini della riduzione delle emissioni di NO_x si è diffuso nei motori diesel e in alcuni motori a benzina l'impiego del ricircolo dei gas di scarico (EGR, Exhaust Gas Recirculation). Questa tecnica consiste nel prelevare una certa quantità di gas allo scarico reintroducendola nei cilindri insieme all'aria aspirata, la cui portata volumetrica risulta quindi ridotta di una quantità corrispondente alla portata di gas riciclato. L'effetto del ricircolo è quello di abbassare le temperature di picco in camera di combustione, con influenza diretta sulla produzione di NO_x. Tuttavia il gas ricircolato e aspirato nuovamente dal motore aumenta la contaminazione dell'olio lubrificante da parte di materiale carbonioso, di incombusti provenienti dal combustibile e di sostanze acide generate in camera di combustione. L'uso dell'EGR richiede pertanto una maggiore attenzione alle proprietà neutralizzanti e disperdenti del lubrificante.

La ricerca di un esasperato isolamento acustico del vano motore tende a ostacolare la perdita di calore verso l'esterno con un aumento generale delle temperature del motore. La conformazione aerodinamica delle vetture, con la ricerca del migliore coefficiente aerodinamico di resistenza all'avanzamento, ai fini della riduzione della potenza perduta per resistenza aerodinamica, non migliora la situazione termica gravosa dei motori. Le proprietà antiossidanti degli oli vengono anche in tal caso alla ribalta per la loro fondamentale importanza ai fini del mantenimento delle prestazioni del lubrificante nel tempo.

Parallelamente a tutto questo, la tendenza all'allungamento degli intervalli di manutenzione delle vetture spinge i costruttori a prolungare anche gli intervalli di cambio dell'olio. A tal fine diviene sempre più frequente la richiesta da parte di molti costruttori verso oli *long life*, cioè capaci di durare più a lungo di oli tradizionali. Il conferimento di proprietà long life porta naturalmente al rafforzamento di tutti gli aspetti prestazionali dell'olio stesso, il cui effetto viene valutato attraverso prove motoristiche normalizzate di maggiore severità.

Lubrificanti per la trasmissione

Funzioni dei lubrificanti per trasmissioni

Le caratteristiche dell'olio per gli apparati di trasmissione sono in parte diverse da quelle dell'olio motore in quanto non sono presenti le cause di contaminazione e le elevate temperature che si riscontrano nella applicazione di questi ultimi. Le loro funzioni possono così essere riassunte: formare anche nelle più severe condizioni di esercizio un film lubrificante tra i vari accoppiamenti in movimento relativo e in particolare tra le superfici dei denti degli ingranaggi; asportare il calore prodotto per attrito; proteggere le superfici metalliche dalla ossidazione.

La capacità dell'olio di sopportare i carichi è fondamentale, date le elevate pressioni che si generano tra i denti in presa degli ingranaggi. Tali pressioni e le conseguenti alte temperature locali possono rendere inadeguato il film solido che si forma in presenza di additivi antiusura; in questi casi è necessario l'impiego di particolari additivi detti per EP che sono in grado di reagire con le superfici stesse per formare composti che agiscono da lubrificanti solidi.

Classificazioni e specifiche prestazionali

Gli oli per trasmissione automobilistica comprendono gli oli per cambi e differenziali e gli oli per trasmissioni automatiche (ATF, Automatic Trasmission Fluids), questi ultimi largamente diffusi negli Stati Uniti ma relativamente poco presenti in Europa, con la sola eccezione dei moderni mezzi di trasporto pubblici.

Gli oli per cambi e differenziali rientrano nella più generale categoria degli oli per ingranaggi, di cui costituiscono uno dei casi più severi per il disegno (ingranaggi ipoidi), i carichi, le condizioni di temperatura in cui operano.

Come per gli oli motore, anche per gli oli per trasmissioni la SAE ha predisposto un sistema di classificazione viscosimetrica basato su misure a bassa e alta temperatura (SAE J 306) che servono da guida alla scelta del lubrificante in funzione delle condizioni ambientali e delle sollecitazioni termiche previste dall'impiego.

Le prestazioni degli oli per trasmissioni sono comunemente identificate dalla serie MIL-L-2105, definita da un apposito organismo militare statunitense, e dalle serie GL (Gear Lubricant) e MT (Manual Transmission), a cura dell'API. I costruttori europei si rifanno a specifiche API

integrate in molti casi da specifiche proprie. Tali specifiche sono mirate per ogni settore applicativo e richiedono differenti proprietà al lubrificante; da questo punto di vista, la caratteristica principale è il possesso o meno di proprietà EP.

Buona parte delle esigenze dei cambi automatici sono soddisfatte da fluidi per trasmissione automatica ATF. Le trasmissioni automatiche moderne richiedono oli in grado di assolvere a una serie complessa di compiti: essi infatti agiscono come convertitori di coppia, fluidi idraulici, oli per ingranaggi, fluidi per lo smaltimento del calore. La funzione principale rimane peraltro quella di fornire caratteristiche d'attrito adeguate al corretto funzionamento di un sistema di frizioni in bagno d'olio. Tale sistema è di norma costituito da una serie di piatti d'acciaio accoppiati a frizioni di refrattario, carta, grafite, bronzo, ecc.

Nel 1967 General Motors introdusse il marchio DEXRON: l'omologazione del prodotto era accompagnata dalla licenza d'uso del marchio sulla confezione. Da allora a oggi la specifica DEXRON si è progressivamente evoluta. Ford ha seguito la stessa strada con l'introduzione del proprio marchio MERCON.

Particolare rilievo, specie nel settore della trazione pesante e di off-highway (movimento terra, costruzioni, trattori, ecc.), rivestono le specifiche degli oli per trasmissione emesse dalla apposita divisione di General Motors e da Caterpillar.

Per la lubrificazione delle macchine agricole, a causa della presenza di organi meccanici particolari (quali i freni in bagno d'olio) e della necessità di unificare la lubrificazione di tali organi quanto più possibile, sono presenti lubrificanti specifici: oli destinati alla lubrificazione sia del motore sia degli organi ausiliari (STOU, Super Tractor Oil Universal); oli destinati alla lubrificazione dei soli organi ausiliari ma non a quella del motore (UTTO, Universal Tractor Trasmission Oil). Si tratta in genere di oli che rispondono alle specifiche dei principali costruttori di veicoli off-road (Deutz-Allis, J.I. Case, John Deere, Massey-Ferguson, ecc.) e che prevedono, oltre a vari requisiti reologici, prove d'usura, di corrosione e d'ossidazione, di compatibilità con gli elastomeri, di tolleranza all'acqua, e test su apparecchiature che simulano il reale esercizio.

Fluidi speciali

A completamento della gamma dei prodotti per autotrazione sono presenti altri fluidi, la cui funzione principale può essere o meno quella di lubrificare i componenti meccanici, dei quali si fa solo menzione. Si tratta di oli motore per rodaggio e protettivi, fluidi per sistemi frenanti e frizioni idrauliche, per sistemi idraulici centralizzati (CHF, Central Hydraulic Fluid), e per sistemi di raffreddamento. Per alcune applicazioni, infine (ingrassaggio, oli per sistemi di condizionamento) si fa impiego di prodotti *for life* di derivazione industriale.

8.4.3 Principali componenti dei lubrificanti per autotrazione

Oli base

Impiego degli oli base nei lubrificanti per autotrazione

Accanto agli oli base minerali, ottenuti dalla lavorazione del greggio, acquistano sempre maggior importanza le basi non convenzionali (NCBO, Non Conventional Base Oils) e quelle sintetiche così definite perché non derivano direttamente dalla lavorazione del greggio o perché si ottengono da processi di sintesi.

Oli base minerali e NCBO derivanti dalla lavorazione dei greggi petroliferi sono trattati nei capitoli 8.1 e 8.2 del II volume. Le basi sintetiche più largamente utilizzate nel settore dei lubrificanti per autotrazione sono: PAO (polialfaolefine, basi idrocarburiche da α-olefine idrogenate), PIO (poly internal olefins, poliolefine interne) basi idrocarburiche da olefine interne idrogenate), esteri. Altre basi sintetiche di uso più limitato sono: poliglicoli, polibuteni, aromatici alchilati.

La scelta della base o della miscela di basi è fondamentale perché, anche se molte proprietà del lubrificante vengono garantite da un'adeguata additivazione, la natura chimica della base può influenzare pesantemente alcune caratteristiche prestazionali del lubrificante.

Quindi, a seconda della base impiegata, si avranno effetti positivi o meno sia sulle caratteristiche chimico-fisiche e reologiche sia su quelle prestazionali del lubrificante finito.

Basi minerali

Le loro caratteristiche dipendono dalla composizione idrocarburica del greggio, nonché dalla severità del processo di estrazione e di deparaffinazione. Si possono comunque definire alcune caratteristiche generali, tipiche di questa tipologia di basi. La presenza di composti aromatici determina un buon potere solvente e una discreta resistenza all'ossidazione grazie ai composti solforati che fungono da antiossidanti naturali. Per contro, i composti aromatici possono dare luogo a prodotti di polimerizzazione che a lungo andare danno origine a depositi.

Le basi minerali presentano caratteristiche a freddo decisamente inferiori a quelle delle basi sintetiche a causa dell'elevato contenuto di *n*-paraffine, per cui consentono di formulare lubrificanti in gradazioni viscosimetriche non particolarmente fluide.

Infine esse presentano una volatilità superiore alle basi sintetiche che, unitamente alla degradazione causata dai

processi ossidativi, può contribuire a un più rapido deterioramento del lubrificante.

Basi minerali non convenzionali

I processi impiegati nella produzione delle basi non convenzionali consentono di raggiungere una composizione finale dei tagli relativamente indipendente dalle caratteristiche del greggio d'origine. Pertanto la qualità di questi oli base è superiore a quella degli oli base ottenuti dal ciclo tradizionale al solvente, rispetto ai quali offrono i seguenti vantaggi:

- volatilità inferiore a pari viscosità (minor consumo in esercizio);
- indice di viscosità superiore (intervallo di temperature d'impiego più ampio);
- miglior stabilità alla temperatura (vita utile più lunga);
- tenore di zolfo basso o trascurabile (elemento di sempre maggiore importanza per gli oli motore, a causa delle crescenti richieste di compatibilità con i dispositivi di trattamento dei gas di scarico).

Basi sintetiche

Le PAO costituiscono la classe di basi sintetiche maggiormente usate in autotrazione. Sono costituite da catene idrocarburiche sature a elevato grado di ramificazione. Presentano caratteristiche a freddo e volatilità molto migliori degli oli minerali derivati da processi di estrazione al solvente, hydrocracking o idroisomerizzazione.

Sono poco polari e di conseguenza hanno limitato potere solvente (solvency), che può andare a scapito della capacità di solubilizzazione degli additivi polari presenti nell'olio lubrificante e dei prodotti di ossidazione che si formano in esercizio.

Un'altra classe di basi sintetiche tipicamente usata in autotrazione è costituita dagli esteri; essi sono composti polari e per questo motivo vengono generalmente impiegati in miscela con le PAO. In funzione del tipo di acido e di alcol impiegati nella sintesi è possibile impartire alla base le caratteristiche reologiche e prestazionali desiderate. Grazie alla loro capacità lubrificante e, dove richiesto, all'elevata biodegradabilità, gli esteri trovano largo impiego negli oli per motori a due tempi.

Altre classi di basi sintetiche trovano impiego in settori della lubrificazione particolari.

Classificazione degli oli base (secondo API e ATIEL)

Sia API che ATIEL prevedono un criterio di classificazione degli oli base in relazione al contenuto di zolfo, di saturi e all'indice di viscosità (**tab. 2**).

tab. 2. Classificazione API e ATIEL degli oli base. Le regole di intercambiabilità nei lubrificanti finiti variano in base al gruppo di appartenenza

Gruppo	Saturi (% in peso)	Zolfo (% in peso)	Indice di Viscosità (IV)
I	<90	e/o >0,03	80-120
II	≥90	≤0,03	80-120
III	≥90	≤0,03	≥120
IV	PAO		
V	tutte le altre basi		
VI (*)	PIO		

(*) solo ATIEL.

Additivi

Il contenuto d'additivi nell'olio lubrificante va da poche parti per milione a vari punti percentuali e, in base alla funzione che tali prodotti devono svolgere, essi possono essere classificati in:

- sostanze che hanno come scopo il miglioramento delle caratteristiche intrinseche degli oli base (modificatori dell'indice di viscosità e miglioratori del punto di scorrimento);
- sostanze protettive del lubrificante (antiossidanti);
- sostanze che impartiscono nuove proprietà e proteggono le superfici metalliche del motore (detergenti, disperdenti, modificatori d'attrito, additivi antiusura-EP, antiruggine e inibitori di corrosione).

Modificatori dell'indice di viscosità

La viscosità è la principale proprietà fisica del lubrificante ed è una misura delle interazioni intermolecolari dell'olio e quindi della resistenza al suo scorrimento. All'aumentare della temperatura la viscosità del lubrificante tende a diminuire causando anche la diminuzione dello spessore del film lubrificante fra le parti in moto relativo. I modificatori dell'indice di viscosità (Viscosity Index Improvers, VII, o Viscosity Modifiers, VM) influenzano l'andamento viscosità-temperatura, rallentando la diminuzione della viscosità al crescere della temperatura grazie alle variazioni conformazionali che la loro struttura subisce in funzione della temperatura.

I modificatori dell'indice di viscosità sono polimeri a peso molecolare variabile appartenenti alle seguenti categorie principali:

- copolimeri etilene-propilene idrogenati (detti anche OCP, Olefin Co-Polymers);
- poliisopreni idrogenati che possono essere lineari, parzialmente ramificati o a stella;
- polimetacrilati (PMA PolyMathAcrylates) di alcoli a catena lunga variabile da C_{12} a C_{18}, lineare e/o parzialmente ramificata;

- copolimeri stirene-isoprene idrogenati, che possono essere lineari, parzialmente ramificati o a stella;
- poliisobuteni (PIB PolyIsoButenes).

A bassa temperatura, questi polimeri hanno una struttura raccolta che minimizza le interazioni con la base lubrificante; con l'aumentare della temperatura, il polimero aumenta le interazioni con la base, estende le sue catene e si espande, contrastando la diminuzione di viscosità della base.

Nella produzione dei VM il controllo del peso molecolare e della sua distribuzione rappresenta un elemento critico poiché questi parametri regolano due importanti caratteristiche del polimero come il potere ispessente e la stabilità al taglio meccanico.

Miglioratori del punto di scorrimento

Tali additivi (Pour Point Depressant, PPD) migliorano le caratteristiche di scorrimento a bassa temperatura del lubrificante. I tipi principali sono costituiti da polimetacrilati, copolimeri etilene-vinilacetato, polifumarati.

L'effetto dei PPD dipende largamente dalle caratteristiche delle basi impiegate e dalla loro concentrazione. Normalmente l'azione di tali additivi è più efficace nei confronti delle basi fluide (SN 80, SN 150). Ogni classe di PPD ha un limite d'efficacia: al di sopra di una certa percentuale cessa l'effetto sul punto di scorrimento (che in certi casi può peggiorare) e comincia a farsi sentire l'effetto ispessente. Le percentuali di trattamento tipiche variano tra lo 0,1 e l'1%.

Antiossidanti

L'ossidazione è il risultato dell'interazione dei componenti del lubrificante con l'ossigeno alle temperature d'esercizio del motore. Essa è la principale causa di degradazione dell'olio e porta alla formazione di specie acide che man mano aumentano di peso molecolare, dando origine a lacche e morchie che portano a un incremento di viscosità del lubrificante e formano depositi nelle zone fredde del motore.

La degradazione ossidativa del lubrificante avviene a causa di una serie complessa di reazioni radicaliche a catena, che viene contrastata con particolari additivi antiossidanti o inibitori d'ossidazione. Tali additivi da una parte interrompono le reazioni chimiche responsabili dei processi citati e dall'altra decompongono i primi prodotti di degradazione impedendone l'ulteriore evoluzione verso specie più dannose.

I tipi principali di questa classe di sostanze sono: ammine aromatiche alchilate, fenoli stericamente impediti, zinco dialchilditiofosfati, derivati dell'acido dialchilditiocarbammico.

Le ammine e i fenoli impediti agiscono come trappole di radicali (*radical scavenger*) trasformando i perossidi reattivi in specie inattive. Gli zincoditiofosfati, oltre ad agire con questi meccanismi, decompongono eteroliticamente gli idroperossidi (ROOH) disattivandoli.

Detergenti e disperdenti

Costituiscono due delle più importanti categorie di additivi degli oli motore e hanno la funzione di mantenere il motore pulito. Tale obiettivo viene perseguito cercando di ridurre la formazione dei depositi e di mantenere in sospensione quei prodotti insolubili che da essi derivano, contrastando la loro ulteriore aggregazione e adesione sulle superfici metalliche calde/fredde.

Detergenti metallici. Servono per neutralizzare i prodotti acidi derivanti dalla combustione (acidi organici e ossidi di zolfo), ridurre lacche e depositi nei pistoni e prevenire problemi alle fasce elastiche in condizioni severe di temperatura. Sono generalmente costituiti da dispersioni colloidali in basi lubrificanti di carbonato di metalli alcalini o alcalino-terrosi, stabilizzate da uno strato adsorbito di molecole surfattanti. Il nucleo carbonatico, tipicamente amorfo, rappresenta la riserva di basicità necessaria alla neutralizzazione dei composti acidi, mentre lo strato di tensioattivo è costituito da sali di acidi a catena oleofila sufficientemente lunga (sapone) per assicurare la stabilità del colloide. Le principali classi chimiche di detergenti metallici usualmente impiegate sono: solfonati, solfofenati, salicilati.

Il valore del numero di basicità (BN) determina le capacità neutralizzanti dell'additivo mentre il tenore di sapone determina la sua efficacia detergente vera e propria. A seconda dell'abilità neutralizzante del detergente si distinguono detergenti neutri ($BN \leqslant 25$) e sovrabasici ($BN > 25$). Nell'autotrazione si impiegano principalmente detergenti a base di metalli alcalino-terrosi e soprattutto quelli a base di calcio.

Disperdenti. Sono additivi fondamentali ai fini delle prestazioni, dato che controllano lo stato d'aggregazione di morchie e, nei motori diesel, della fuliggine; nel lubrificante costituiscono oltre il 50% dell'additivazione. Tra le tipologie molecolari più importanti si annoverano i derivati delle anidridi succiniche (succinimmidi, succinesteri, ecc.) di impiego diffusissimo e la cui sintesi è ormai documentata da più di 1.500 brevetti.

Anche i disperdenti sono costituiti da molecole anfifiliche nelle quali la porzione lipofilica è generalmente costituita da catene poliolefiniche (in genere poliisobutene) con peso molecolare variabile tra 700 e 3.000, mentre il gruppo polare è in genere il derivato di una poliammina o di un poliolo. Il legame tra queste due parti della molecola finale viene ottenuto mediante differenti reazioni chimiche. Le più importanti classi dei disperdenti sono: succinimmidi, esteri succinici, alchilfenolammine (basi di Mannich), disperdenti polimerici.

Fra tutte, le succinimmidi sono probabilmente la classe più importante e quella prodotta in maggiori volumi. Si preparano in due stadi: il primo consiste nel funzionalizzare la catena di un oligomero alchilico (poliolefine, preferibilmente poliisobutene) con anidride maleica

per dar luogo a una poliisobutilensuccinanidride (PIBSA), il secondo nel convertire la PIBSA nella polisobutilensuccinimmide finale (PIBSI) facendola reagire con una N-ammino-polialchilammina (per esempio esaetilene epta-ammina, HEHA; tetraetilene penta-ammina, TEPA, ecc.).

Gli esteri succinici impiegati come disperdenti per i lubrificanti per autotrazione sono prodotti formati esterificando un derivato succinico di una poliolefina (analogo a quelli impiegati per le succinimmidi) con mono- o poli-alcoli (per esempio pentaeritritolo), in modo da produrre disperdenti con pesi molecolari in genere dello stesso ordine di grandezza di quelli delle succinimmidi.

Le alchilfenolammine sono costituite da fenoli poliisobutilenici (o polialchil-sostituiti) fatti reagire con polialchilenammine mediante formaldeide, attraverso la reazione di Mannich.

Modificatori di attrito

Tali additivi sono delle specie chimiche in grado d'influenzare il coefficiente di attrito in condizioni di lubrificazione limite. Possono essere costituiti da molecole organiche anfifiliche molto lunghe oppure da composti metallo-organici (in genere a base di molibdeno). La riduzione del coefficiente di attrito delle superfici avviene mediante formazione su di esse di film di molecole a elevata scorrevolezza (per esempio MoS_2 nel caso del ditiocarbammato di Mo).

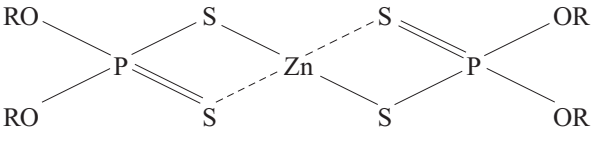
Additivi antiusura/EP

Sono additivi che vengono principalmente impiegati per ridurre l'usura in condizioni di lubrificazione limite. In condizioni di carico medio-alte o elevate (EP), reagiscono con le superfici metalliche formando strati tribochimici protettivi. Negli oli motore svolgono essenzialmente funzioni antiusura. Il ruolo EP, marginale, viene lasciato ai detergenti metallici.

La principale classe di antiusura è costituita dagli zincodialchilditiofosfati, la cui introduzione ha coinciso con il decollo della tecnologia di additivazione per lubrificanti. Si hanno inoltre antiusura a base di molibdeno (dialchilditiofosfati, ditiocarbammati), composti organici e detergenti metallici.

Negli oli per trasmissioni è diffuso l'utilizzo di additivi EP. Tra questi, i principali sono: solforizzati (antiusura/EP), composti zolfo-fosforo (antiusura/EP), paraffine clorurate (EP).

La struttura chimica dei ditiofosfati di zinco è così rappresentabile:



La parte alcossido (RO) deriva da un alcol primario a catena corta ($<C_6$) o a catena lunga (C_6-C_8) nei ditiofosfati primari o da un alcol secondario (C_3-C_3-C_6) nei ditiofosfati secondari, raramente da un alchilfenolo (ditiofosfati arilici).

Sono composti polari e per questo motivo vengono generalmente impiegati in miscela con le PAO. La stabilità termica aumenta nell'ordine: secondari, primari a catena corta, primari a catena lunga, acrilici, mentre l'efficacia antiusura varia nell'ordine inverso. L'additivo antiusura infatti funziona come tale perché, decomponendosi alle temperature di contatto metallo-metallo reagisce con le superfici e forma strati a basso coefficiente d'attrito. Come già detto, i ditiofosfati di zinco svolgono inoltre un'azione antiossidante molto efficace.

Attualmente, l'impiego dei ditiofosfati di zinco viene limitato poiché il fosforo in essi contenuto, rilasciato durante la parziale combustione del lubrificante, può interagire negativamente con i sistemi catalitici di trattamento dei gas esausti.

Anticorrosivi/antiruggine

Servono per proteggere le superfici metalliche del motore dalla corrosione e dagli agenti aggressivi generati durante la combustione (acqua, prodotti acidi, ossidanti, ecc.) o per protezione nel trasporto e nello stoccaggio. La loro azione si esplica grazie alla creazione di una barriera fisica, che essi stessi formano sulla superficie metallica, la quale impedisce l'attacco della superficie da parte degli agenti corrosivi.

I principali tipi sono: alcoli etossilati, acidi carbossilici a lunga catena, esteri fosforici, ammine, imidazoline e tioderivati.

Per la loro natura sono composti che possono dar luogo a fenomeni che si contrappongono ad altre classi di additivi (per esempio i ditiofosfati di zinco), con le quali spesso entrano in competizione per trattare le superfici metalliche, o che possono influenzare negativamente altre proprietà del mezzo nel quale operano (per esempio la demulsività). La presenza nel motore di superfici metalliche di varia natura, inoltre, spesso richiede l'impiego di miscele di diversi additivi anticorrosione.

8.4.4 Lubrificanti per l'industria

Classificazione

Per assicurare un'efficace lubrificazione è importante selezionare la corretta viscosità affinché si formi un film lubrificante in grado di separare le due superfici in contatto. In generale è necessaria un'elevata viscosità dell'olio in presenza di alti carichi e basse velocità; invece nel caso di velocità elevate, proprio per ridurre gli attriti, si utilizzano lubrificanti molto fluidi. È stato definito pertanto un sistema di classificazione viscosimetrica dei lubrificanti impiegati nell'industria.

tab. 3. Classificazione viscosimetrica dei fluidi lubrificanti industriali (ISO 3448)

Simbolo ISO	Viscosità media (cSt a 40 °C)	Intervallo di viscosità (cSt a 40 °C)	
		min.	max.
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42
ISO VG 3	3,2	2,88	3,62
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06
ISO VG 7	8,8	6,12	7,48
ISO VG 10	10	9,00	11,0
ISO VG 15	16	13,5	16,5
ISO VG 22	22	19,8	24,2
ISO VG 32	32	28,8	36,2
ISO VG 46	46	41,4	60,8
ISO VG 68	68	61,2	74,8
ISO VG 100	100	90	110
ISO VG 150	150	136	186
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	362
ISO VG 480	460	414	508
ISO VG 680	680	614	748
ISO VG 1000	1.000	900	1.100
ISO VG 1500	1.500	1.350	1.850

Esistono numerosi metodi per determinare la corretta viscosità di un olio in relazione agli accoppiamenti meccanici industriali: alcuni di questi sono normalizzati, altri sono stati sviluppati da costruttori come nel caso, per esempio, degli ingranaggi e dei cuscinetti.

Il loro scopo è quello di fornire, unitamente all'indice di viscosità (IV), una guida per la scelta del lubrificante più adatto all'applicazione.

In passato in Europa veniva utilizzata la viscosità Engler, mentre negli Stati Uniti si usava il sistema SUS. Oggi per gli oli per l'industria si è affermato il sistema ISO (International Standardization Organisation), che fa riferimento alla viscosità cinematica a 40 °C in mm^2/s (o centistoke, cSt). La temperatura di riferimento (40 °C) è stata scelta in modo da essere vicina sia alla media delle temperature d'esercizio, sia alle temperature di riferimento dei vecchi metodi di classificazione della viscosità dei lubrificanti. Le gradazioni standard previste, definite ISO VG (ISO Viscosity Grade), consentono di coprire tutte le esigenze pratiche di lubrificazione industriale (**tab. 3**).

Nella definizione di lubrificanti industriali ricadono numerosissimi prodotti con caratteristiche estremamente diverse tra loro nella composizione e destinati a moltepici e differenti applicazioni. Infatti, in questa categoria si possono individuare quattro tipologie fondamentali di prodotto: i fluidi lubrificanti industriali propriamente detti, i grassi lubrificanti, i prodotti per lavorazioni meccaniche e gli oli per applicazioni varie e di processo.

L'ISO ha effettuato una puntuale ed estesa classificazione dei lubrificanti industriali emettendo la classificazione standard ISO 6743-99 ove sono individuate 18 famiglie di prodotti, in funzione dell'applicazione, ognuna contraddistinta da una lettera dell'alfabeto (**tab. 4**). Si tratta di tutti i tipi di prodotti destinati alla lubrificazione del macchinario industriale, quali oli idraulici, oli per turbine, oli per compressori, oli per cuscinetti e oli per ingranaggi industriali.

Le caratteristiche rilevanti ai fini dell'applicazione sono: viscosità/indice di viscosità, punto di scorrimento, demulsività, proprietà antischiuma, trattenimento dell'aria, compatibilità con le guarnizioni, proprietà antiusura, proprietà antiruggine, stabilità all'ossidazione. Oltre a queste caratteristiche ve ne sono altre che tengono conto dell'impiego specifico a cui il prodotto è destinato. Tali caratteristiche sono determinate con modalità di prova elaborate da enti normatori internazionali; per la maggior parte si tratta di metodi ASTM (American Society for Testing and Materials).

Applicazioni

Turbine

Le diverse tipologie di applicazioni richiedono spesso prodotti specifici, come nel caso delle turbine. Infatti per queste sono necessarie particolari prestazioni in termini di stabilità chimica del prodotto. Nel caso delle turbine a vapore l'olio deve avere una spiccata capacità di separarsi dall'acqua che accidentalmente può contaminarlo, mentre per le turbine a gas si esaltano le proprietà di resistenza all'ossidazione. Per gli oli per turbine industriali a vapore e a gas si utilizzano in genere basi minerali speciali di qualità superiore a quella standard, mentre per le turbine a gas di tipo aeronautico vengono utilizzati oli sintetici, in genere esteri o polialfaolefine.

Cuscinetti

Una vasta parte delle applicazioni dei lubrificanti industriali riguarda la lubrificazione di cuscinetti volventi o radenti. Per questi casi si utilizzano oli appositamente formulati che non abbiano problemi di compatibilità con i materiali, possiedano una elevatissima stabilità termossidativa e nel contempo tengano conto delle particolari condizioni operative legate all'applicazione:

tab. 4. Classificazione dei lubrificanti industriali e dei fluidi correlati (ISO 6743-99)

Famiglia (lettera simbolo)	Applicazione
A	Sistemi a perdita
B	Sformanti
C	Ingranaggi
D	Compressori
E	Motori a combustione interna
F	Mandrini e fusi
G	Guide e slitte
H	Sistemi idraulici
M	Lavorazioni metalli
N	Dielettrici
P	Utensili pneumatici
Q	Diatermici
R	Protettivi temporanei
T	Turbine
U	Trattamenti termici
X	Applicazioni di grassi
Y	Altre applicazioni
Z	Macchine a vapore

si possono infatti citare gli oli per cuscinetti per laminatoi, contraddistinti da elevate viscosità ed elevate caratteristiche demulsive, e gli oli per cartiere, che possono essere di tipo minerale ma a volte sono di tipo sintetico (polialfaolefine o poliglicoli) per operare nelle parti calde delle macchine, o addirittura di tipo detergente-disperdente per mantenere in sospensione le fibre di carta che accidentalmente possono inquinarli.

Impianti idrostatici

In questa categoria, costituita essenzialmente da fluidi idraulici per comandi oleodinamici di macchine da cantiere, impianti industriali, ecc., si concentrano i maggiori volumi di lubrificanti industriali. Questi prodotti, oltre a soddisfare determinati requisiti chimico-fisici, devono anche superare prove al banco di tipo tribologico o su *rig test* che simulano l'impiego reale. Le specifiche del settore sono di enti (ISO, DIN BS, ecc.) o di costruttori di componenti o macchine (Eaton Vickers, Bosch Rexroth, Denison, ecc.).

Ingranaggi

I prodotti per la lubrificazione degli ingranaggi industriali sono formulati tenendo conto: del tipo d'ingranaggio (disegno/forma); della presenza di coperture o carter; delle pressioni specifiche; dell'area di contatto sui denti in presa; della velocità; del moto relativo (rotolamento o strisciamento); dei materiali. Per applicazioni particolarmente severe, si utilizzano lubrificanti EP a base di composti dello zolfo e del fosforo.

Compressori

La lubrificazione dei compressori costituisce un ampio settore con prodotti estremamente diversificati nella loro formulazione per tener conto sia del tipo di compressore sia della composizione chimica del gas da comprimere.

Nei compressori per aria alternativi, l'aria raggiunge, a seconda delle modalità operative, temperature anche attorno a 200 °C; in queste condizioni l'olio può dar origine a depositi sulle valvole e sulla parte superiore dei cilindri. È quindi importante che l'olio sia in grado di resistere all'ossidazione e che abbia una bassa tendenza a lasciare depositi. Nei compressori a vite, l'aria viene compressa per confinamento tra due viti incapsulate in un carter. In questo caso l'olio è immesso in grandi quantità e finemente nebulizzato nell'aria con la funzione sia di lubrificare sia di asportare il calore. Le temperature che si raggiungono sono più basse (100-120 °C), ma poiché il lubrificante è continuamente separato dall'aria e riutilizzato, gli si richiede una spiccata resistenza all'ossidazione.

In generale per la compressione di altri gas e dei gas frigorigeni nascono ulteriori problemi quali la miscibilità o immiscibilità a seconda delle modalità operative del circuito di lubrificazione, nonché problemi di stabilità chimica reciproca tra gas e lubrificante.

Nei compressori di tipo dinamico (centrifughi e assiali) i problemi di lubrificazione, salvo casi particolari di compatibilità con il gas, possono essere ricondotti a quelli delle turbine a vapore.

Guide e slitte

Sono organi meccanici diffusi praticamente in tutti i macchinari industriali. Particolare è la situazione delle macchine utensili dove, per raggiungere un'elevata precisione in produzione, i giochi tra slitta e guida devono essere estremamente limitati e occorre evitare le condizioni di lubrificazione idrodinamica che ridurrebbero la regolarità e l'uniformità del movimento delle slitte portautensili (o delle tavole portapezzo). Occorre cioè evitare il fenomeno dello *stick and slip* che è provocato dalla lacerazione del film lubrificante durante il movimento. All'atto di questa lacerazione, le superfici metalliche vengono a diretto contatto e l'attrito aumenta. Al momento in cui la potenza motrice vince questa resistenza

tab. 5. Consistenza e modalità di applicazione del grasso lubrificante

Numero NLGI	Penetrazione lavorata (dmm)	Consistenza	Modo di applicazione
000	445-475	fluido	sistemi centralizzati
00	400-430	fluido	sistemi centralizzati
0	355-385	semifluido	sistemi centralizzati
1	310-340	molto tenero	Ingrassatori a pistola e sistemi centralizzati
2	265-295	tenero	ingrassatori a pistola
3	220-250	bassa	ingrassatori a pressione
4	175-205	bassa	ingrassatori Stauffer
5	130-160	alta	grasso in pani
6	85-115	duro	grasso in pani

addizionale si ha un brusco aumento di velocità. Il ripetersi di questi rallentamenti e accelerazioni irregolari produce un movimento a sbalzi, che si ripercuote sull'utensile e quindi sulla finitura del pezzo in lavorazione. Per evitare l'inconveniente descritto si usano oli additivati con sostanze a elevata polarità che riducono il coefficiente di attrito statico, rendendo in tal modo regolare il movimento.

Grassi lubrificanti

Secondo la definizione fornita dall'ASTM, un grasso lubrificante è un prodotto da solido a semifluido costituito da un agente ispessente in un lubrificante liquido nel quale possono essere presenti altri ingredienti (additivi e lubrificanti solidi) che impartiscono proprietà speciali. Tale definizione stabilisce un concetto fondamentale, ossia il grasso non è un olio molto viscoso, ma un olio ispessito, un sistema multifase costituito da due componenti distinti: l'ispessente (agente addensante) e un olio fluido. In base a ciò, variando la percentuale di ispessente varia la consistenza del prodotto, che è codificata tramite numeri dalla statunitense NLGI (National Lubricating Grease Institute). Le differenti consistenze sono necessarie in funzione del tipo di applicazione e di erogazione del grasso, della posizione del pezzo da lubrificare e dell'efficienza delle tenute (**tab. 5**).

Per ottenere la consistenza voluta si utilizzano numerosi tipi di agenti ispessenti, le cui categorie principali sono costituite da saponi, saponi complessi, ispessenti organici e ispessenti inorganici.

I saponi sono ottenuti dalla saponificazione di un acido grasso con un metallo alcalino o alcalino-terroso. I grassi complessi sono ottenuti facendo reagire contemporaneamente un acido grasso e un secondo composto polare, chiamato agente complessante, con un componente basico. Tali grassi sono stati sviluppati in quanto consentono di operare a temperature più elevate rispetto ai saponi semplici.

Come ispessenti organici si intendono quelli a base di poliuree ottenute dalla reazione di isocianati e ammine. Essi presentano un'elevata stabilità nel tempo e pertanto sono utilizzati in componenti lubrificati a vita.

Come ispessenti inorganici, i più diffusi sono quelli al bentone ottenuti a partire da particolari argille: la bentonite e l'ettorite. Presentano la caratteristica di non avere un punto di fusione vero e proprio e per tale motivo si prestano a essere utilizzati in ampi intervalli di temperatura. Altra categoria sono gli ispessenti a base di silice. Infine si hanno anche i solfonati di calcio sovrabasici. Tale varietà d'ispessenti è motivata dal fatto che, oltre alle forti differenze di costo tra una tipologia e l'altra, cambiano anche le prestazioni (**tab. 6**).

L'olio base utilizzato nella formulazione di un grasso può essere di tipo minerale, vegetale o sintetico in funzione delle prestazioni attese e dell'applicazione.

I grassi, alla pari dei lubrificanti liquidi, vengono additivati per conferire loro particolari proprietà, quindi si utilizzano antiossidanti, antiusura, agenti EP, antiruggine, inibitori di corrosione, eccetera.

L'impiego dei grassi per la lubrificazione e per la protezione degli organi meccanici avviene in tutti quei casi in cui l'esiguità degli spazi o i problemi di tenuta non consentono l'impiego di lubrificanti liquidi. I grassi, in molte applicazioni, sono utilizzati a perdita (siderurgia, macchine continue di cartiere ecc.), ma in vari casi hanno

la funzione di lubrificare a vita un componente (cuscinetti volventi o piccoli riduttori).

Prodotti per lavorazioni meccaniche

Si tratta di una gamma molto ampia di prodotti che, sfruttando le proprietà intrinseche degli oli di lubrificare e di raffreddare, facilitano le lavorazioni meccaniche, le quali possono essere distinte in due categorie principali: per deformazione plastica e con asportazione di materiale.

Le lavorazioni per deformazione plastica consentono di ottenere pezzi della forma finale voluta agendo sui grezzi con azioni di deformazione. Tali lavorazioni possono essere eseguite a freddo o a caldo a seconda del tipo e dell'entità di deformazione che il pezzo deve subire.

Alcune di queste operazioni riguardano la lavorazione del metallo nel processo metallurgico (siderurgia) quali la laminazione, l'estrusione delle barre, la formatura dei tubi dal pieno fino alla trafilatura di fili. Altre operazioni di deformazione plastica sono volte all'ottenimento dei prodotti o dei componenti finiti, quali lo stampaggio, l'imbutitura, la piegatura, la punzonatura, ecc.

Nelle operazioni di deformazione plastica il requisito principale richiesto al lubrificante è la riduzione dell'attrito che ha una diretta influenza sulla vita dell'utensile, sul consumo di energia e sulla finitura delle superfici. Tuttavia è sempre necessario ottimizzare le prestazioni; per esempio in laminazione si cerca di ottenere un coefficiente d'attrito sufficientemente basso per garantire bassi consumi energetici, ma si devono evitare fenomeni di slittamento che impedirebbero la presa del materiale in entrata. Nelle lavorazioni a caldo, si sfrutta l'aumento della plasticità che si verifica nei metalli al crescere della temperatura senza peraltro raggiungere il punto di fusione.

Le lavorazioni con asportazione di materiale consistono nell'asportare dal pezzo grezzo in lavoro, mediante l'impiego di uno o più utensili, uno strato di metallo superficiale che si trasforma in truciolo. Queste lavorazioni si eseguono a freddo, cioè senza riscaldare preventivamente il metallo da lavorare.

Prodotti emulsionabili

I prodotti emulsionati con acqua sono utilizzati in quelle lavorazioni ove è necessario esaltare le capacità raffreddanti. Le tipologie utilizzate sono le più svariate, in considerazione del fatto che i materiali da lavorare hanno diverse caratteristiche meccaniche che ne influenzano la lavorabilità nonché la compatibilità (problemi di macchiatura), e le caratteristiche di lavorazione sono molteplici.

Le emulsioni utilizzate sono di solito del tipo olio/acqua; la loro formulazione è generalmente la seguente:

- un olio minerale preferibilmente a base naftenica o mista;
- sostanze emulsionanti (o emulganti), come le miscele di solfonati naturali o sintetici;
- sostanze stabilizzanti, come i composti alcolici, che contribuiscono a rendere più stabile il legame tra gli emulganti e l'olio;
- additivi antiruggine;
- sostanze batteriostatiche o battericide e contro la proliferazione fungina;

tab. 6. Proprietà dei grassi lubrificanti in funzione del tipo di ispessente (S=scarsa; D=discreta; B=buona; E=eccellente)

Proprietà	Sodio	Calcio convenzionale	Calcio anidro	Litio	Alluminio complesso	Calcio complesso	Litio complesso	Poliurea	Bentonite
Aspetto	Liscio, fibroso	Liscio, burroso	Liscio, burroso	Liscio, burroso	Liscio, burroso	Liscio, burroso	Liscio, burroso	Liscio, burroso	Liscio, burroso
Punto goccia (°C)	170	100	140	190	260+	260+	260+	240	infusibile
Max temperatura d'impiego (°C)	120	80	120	140	170	170	180	180	180+
Resistenza all'acqua	D-S	B-E	E	B	B-E	B-E	B	B-E	B
Stabilità ossidazione	D	S	B-E	B-E	B-E	D	B-E	B-E	B
Pompabilità	S-D	B-E	B	B	B	S	B-E	B-E	D

- eventuali additivi anticorrosivi (rame), antiusura ed EP;
- additivi antischiuma.

A seconda del tipo di olio e delle applicazioni, le percentuali di olio in acqua possono variare dall'1 al 25% per ottenere la giusta protezione contro la corrosione e per tenere conto della gravosità della lavorazione e del materiale.

Mescolando l'olio emulsionabile con acqua si ottengono emulsioni di aspetto differente a seconda dello stato di dispersione dell'olio, della sua concentrazione e del tipo di emulgatore. Generalmente per la preparazione degli oli emulsionabili destinati alle operazioni di taglio si impiegano emulgatori di tipo ionico, che conferiscono alle emulsioni una reazione leggermente basica (pH=8-9). Si tratta di emulsioni stabili in ambiente alcalino, che però perdono progressivamente la stabilità quando subiscono un inquinamento acido. La stabilità delle emulsioni è anche funzione delle caratteristiche delle acque, in particolare della loro durezza.

Prodotti sintetici

Si definiscono sintetici quei prodotti costituiti esclusivamente da soluzioni acquose di additivi anticorrosivi, untuosanti, antischiuma, battericidi. Tali prodotti sono impiegati per la preparazione di liquidi refrigeranti trasparenti destinati essenzialmente alle operazioni di finitura e super-finitura dei pezzi metallici, eseguite con utensili abrasivi come mole, pietre abrasive, eccetera.

Prodotti interi

Gli oli interi si impiegano nei casi in cui le proprietà lubrificanti sono più importanti dell'asportazione del calore. Questo avviene in alcune operazioni estremamente gravose, quali per esempio la foratura profonda. Gli oli da taglio interi sono costituiti da olio minerale con additivi EP e antiusura. In passato sono stati largamente impiegati come additivi EP quelli a base di cloro o di zolfo-cloro; oggi i prodotti a base di cloro sono stati abbandonati in molti paesi per ragioni prevalentemente ambientali.

Bibliografia generale

Booser E.R. (editor) (1983-1994) *CRC handbook of lubrication: theory and practice of tribology*, Boca Raton (FL), CRC Press, 3v.

Del Ross S. (1977) *I lubrificanti. Caratteristiche fisiche, chimiche e tecnologiche. Raffinazione additivi*, Milano, Etas.

Klamann D. (1984) *Lubricants and related products: synthesis, properties, applications, international standards*, Weinheim, Chemie.

Neale M.T. (1973) *Tribology handbook*, London, Butterworths.

Nortier R.M., Orszulik S.T. (1997) *Chemistry and technology of lubricants*, London, Blackie.

Bibliografia citata

Ertel A.M. (1939) *Hydrodynamic lubrication based on new principles*, «Akad. Nauk SSSR Prikadnaya Mathematica i Mekhanika», 3, 41-52.

Grubin A.N., Vinogradova I.E. (1949) *Investigation of the contact of machine components*, «Central Scientific Research Institute for Technology and Mechanical Engineering», 30.

Riccardo Maione

Eni - Divisione Refining & Marketing
Monterotondo, Roma, Italia

Luigi D'Elia

EniTecnologie
San Donato Milanese, Milano, Italia